

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ
ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ
ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Коротинський Антон Петрович

УДК 681.51:661.66

ДИСЕРТАЦІЯ

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ БАГАТОКАМЕРНИМИ ПЕЧАМИ ВИПАЛЮВАННЯ ВУГЛЕГРАФІТОВИХ ВИРОБІВ

151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

15 Автоматизація та приладобудування

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ А. П. Коротинський

Науковий керівник (консультант) Жученко Олексій Анатолійович, доктор технічних наук, доцент

Київ - 2020

АНОТАЦІЯ

Коротинський А. П. Автоматизація процесу керування багатоканальними печами випалювання вуглеграфітових виробів. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». - Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2020.

Виробництво вуглецевих виробів відіграє важливу роль для розвитку народного господарства країни, оскільки саме продукція даного виробництва широко застосовується в різних галузях промисловості. До таких виробництв можна віднести підприємства чорної та кольорової металургії, машинобудування, хімічної промисловості та інші.

Сучасні світові тенденції розвитку галузей промисловості, що є споживачами виробництва вуглецевих виробів, обумовлюють постійне нарощування обсягів виробництва графітованих та вуглецевих виробів.

Виробництво вуглецевих виробів є надзвичайно ресурсо- та енергозатратним через значний вихід браку в кінцевій продукції та значної тривалості енергозатратного виробництва. Підвищення ефективності даного виробництва навіть на незначний рівень призводить до значних фінансових заощаджень, а тому є актуальною науково-практичною проблемою, особливо в сучасних умовах постійного зростання вартості енергоносіїв.

В роботі проведений аналіз технологічних особливостей процесу виробництва вуглецевих виробів, а також конструктивних особливостей технологічних апаратів даного виробництва показав, що одним із визначальних з токи зору кошту кінцевої продукції та енергозатратних технологічних процесів у виробництві вуглецевих виробів є процес випалювання. Проаналізовано основні технологічні етапи процесу випалювання вуглецевих виробів у багатоканальних печах та досліджено особливості проходження кампанії на цих етапах. Проведено

параметричний аналіз всіх технологічних етапів випалювання, у результаті якого сформовано основні вхідні та вихідні параметри, визначено збурювальні та керувальні впливи.

На основі проведеного аналізу процесу випалювання встановлено ключову роль етапу «камера під вогнем як основної стадії з точки зору формування параметрів якості готової продукції і потенціалу для підвищення ефективності ресурсо- та енергозбереження процесу виробництва вуглеграфітових виробів в цілому.

Підвищення ефективності процесу випалювання вуглецевих виробів базується на визначенні та реалізації у реальному часі оптимальних режимів роботи печі випалювання. Поставлена задача може бути розв'язана шляхом впровадження ефективних систем керування даним технологічним об'єктом на основі його математичної моделі. Проте відомі на сьогоднішній день системи керування процесом випалювання вуглецевих виробів не відповідають сучасним вимогам до їх ефективності, а тому потребують або їх удосконалення або розроблення нових.

У зв'язку з цим, потребує розв'язання актуальне науково-практичне завдання розроблення системи оптимального керування процесом випалювання вуглецевих виробів, яка б відповідала сучасним вимогам ресурсо- та енергозбереження.

Обґрунтовано застосування методу математичного моделювання, як фактично безальтернативного методу дослідження процесу випалювання, вуглеграфітового виробництва та сформульовані задачі даного дослідження.

У результаті проведеного аналізу відомих на сьогоднішній день математичних моделей процесу випалювання та аналогічних йому процесів визначена модель, на основі якої ґрунтується подальше дослідження режимів роботи багатоканальної печі випалювання.

Для математичного моделювання кампанії випалювання вуглецевих виробів реалізована математична модель в розподілених параметрах на основі усереднених по Рейнольдсу рівняння нерозривності, збереження кількості руху,

транспорту хімічних компонентів реакції горіння, енергії в ентальпійному вигляді, турбулентної кінетичної енергії і швидкості її дисипації.

Сформовано методику та порядок проведення досліджень впливу основних технологічних параметрів процесу випалювання вуглецевих виробів на проходження кампанії. Основну увагу при дослідженнях процесу випалювання «зелених» заготовок у багатокамерних печах приділяється визначенню: рівня температур різних типів заготовок протягом всього процесу випалювання; оптимального відповідно до даної конструкції печі завантаження заготовок; рівня температур заготовок при нагріванні димовими газами, при згоранні природного газу, при охолодженні повітрям, що йде на спалювання; швидкості росту мінімальної та максимальної температур у заготовках; перепаду температур у заготовках і по камері печі в цілому; зіставлення рівня температур під склепінням печі з температурами, які досягаються у пересипці і заготовках; впливу розрідження на перепад температур по заготовкам; впливу процесу горіння на температурні поля камери печі; залежності процесів горіння палива та охолодження заготовок від коефіцієнта надлишку повітря і, як результат, його впливу на температурні поля камери.

Результати досліджень показали значну розподіленість температур по робочому об'єму багатокамерної печі випалювання, дозволили визначити зони з мінімальною та максимальною температурами, з максимальним перепадом температур, а також фактори, які впливають на тепловий режим, що надає можливість врахувати ці обставини при побудові систем керування технологічним процесом.

Показано, що математична модель процесу випалювання вуглецевих виробів, яка була використана для дослідження режимів роботи даного технологічного об'єкту, потребує значного часу розрахунку – від декількох годин до декількох десятків годин – і тому не може бути використана у системах керування реального часу. Обґрунтована необхідність побудови спрощені математичної моделі, яка не потребує тривалого часу розрахунку або значних розрахункових

потужностей, а тому може бути використана у системах керування технологічним процесом.

Проведено аналіз відомих методів спрощення математичних моделей, наведено їх переваги та недоліки. На основі аналізу обґрунтовано доцільність використання методу, що базується на наближеному поданні точних розв'язків. Для побудови спрощеної математичної моделі процесу випалювання використовувався метод розділення змінних Фур'є. Розроблені спрощені математичні моделі для трьох режимів роботи камери випалювання – охолодження, нагрівання димовими газами та «камера під вогнем».

Проведене дослідження точності та адекватності розроблених моделей показало їх високу ефективність. Для перевірки розроблених математичних моделей на адекватність реальному технологічному процесу було отримано експериментальні дані температур заготовок протягом кампанії випалювання та при моделюванні спрощеними математичними моделями. Перевірка на адекватність математичних моделей була проведена з використанням статистичних критеріїв Стюдента та Фішера.

Аналіз існуючих на сьогоднішній день критеріїв якості готової продукції показав неможливість їх застосування як критеріїв готовності кінцевої продукції. У даній роботі запропоновано розглядати ентропію як критерій готовності продукції, базуючись на тому, що зміна стану вуглецевих матеріалів, які піддаються термічній обробці, супроводжується зміною їх термодинамічних властивостей.

Проведений аналіз існуючих на сьогоднішній день систем керування процесом випалювання висвітлив переваги та недоліки запропонованих систем керування, а також показав, що основними складнощами при розробленні системи керування даним процесом є неврахування підсосу повітря, температури повітря, що йде на спалювання, інерційність процесу та його перерегулювання.

Запропоновано шляхи для вирішення описаних складнощів, а саме: представлення об'єкта управління як послідовності зв'язаних між собою основних етапів кампанії випалювання, та доцільність використання МРС-керування.

Проведено дослідження впливу горизонтів прогнозування та керування при розробці МРС-регуляторів.

Для дослідження ефективності розробленої системи керування з МРС-регулятором проведено порівняння останньої з класичним ПІД-регулятором, налаштованим методом Циглера – Ніколса, та селективним ПІД-регулятором. Отримані результати свідчать, що ПІД-регулятор використовує найбільшу витрату палива протягом всього етапу керування, середні значення витрати палива складають $54.8 \text{ м}^3/\text{год}$ для системи керування з класичним ПІД-регулятором, $49.1 \text{ м}^3/\text{год}$ з селективним ПІД-регулятором, $44.1 \text{ м}^3/\text{год}$ - для запропонованої системи з МРС-регулятором. Очевидно, що найбільш економічно вигідною системою є МРС-регулятор, яка забезпечує витрату палива менше на 24 % та 11 % відповідно у порівнянні з іншими досліджуваними системами.

Порівнявши результати роботи наведених систем отримано, що класичний ПІД-регулятор програє по всіх розглянутих характеристиках окрім, перепаду температури при переходу від одного режиму роботи до іншого. Найближчим конкуруючим аналогом був селективний ПІД-регулятор, що має хороші показники перепаду та приростів температур по всьому процесі випалювання. Відтак, перевагу отримує МРС-регулятор з досить хорошим показником перепаду та приростів температур протягом всього процесу випалювання, досить простою реалізацією керування та можливістю доопрацювання необхідних особливостей зміною наведених горизонтів.

Обґрунтовано доцільність синтезу системи керування на базі штучних нейронних мереж для вирішення задачі визначення ймовірності дефектів у заготовках. Вирішена задача обмеженості необхідних для навчання нейронної мережі даних шляхом застосування особливої структури – автоенкодера.

В порівнянні з системою керування з класичним ПІД-регулятором, розроблена система забезпечує меншу витрату палива для досягнення продукції необхідної якості. Запропонований регулятор забезпечує менші перепади та прирости температур протягом всього процесу випалювання.

Можливість вибору кроку спуску визначає точність траєкторії оптимального спуску, а тому і точність керування процесом випалювання в цілому системою керування на базі штучних нейронних мереж.

Вибір критерію оптимального спуску робить розроблений регулятор гнучким при використанні в різних умовах та зручним для досягнення різних цілей керування.

Застосування даного алгоритму в будь-який момент часу наприклад, після аварійної ситуації, дає змогу спрогнозувати доцільність та ефективність продовження кампанії випалювання.

Розроблений підхід, що лежить в основі даної системи керування, дозволяє спрогнозувати час ведення кампанії випалювання та значення витрат палива, а тому спрогнозувати економічну ефективність виробництва.

Ефективність усіх розроблених систем керування підтверджена результатами проведених імітаційних моделювань.

Ключові слова: багатокамерна піч випалювання, вуглецеві вироби, математичне моделювання, спрощена математична модель, критерій якості керування, система керування з прогнозуючою моделлю, система керування на базі штучних нейронних мереж.

ABSTRACT

Korotynskyi A. Automation of the control process of multi-chamber furnaces for baking carbon products. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for obtaining a scientific degree of a Ph.D. degree in specialty 151 "Automation and Computer-Integrated Technologies." - National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2020.

The production of carbon products plays an important role in the development of the national economy of the country, since the production of this production is widely

used in various industries. These industries include ferrous and non-ferrous metallurgy, mechanical engineering, chemical industry and others.

Current global trends in the industries that are consumers of carbon products cause a steady increase in the production of graphite and carbon products.

Carbon production is extremely resource- and energy-intensive because of the significant shortage of output and the long duration of energy-consuming production. Increasing the efficiency of this production even to a small level leads to significant financial savings, and therefore is an urgent scientific and practical problem, especially in the current conditions of constant increase in the cost of energy.

The analysis of the technological features of the process of production of carbon products, as well as the design features of technological devices of this production, showed that one of the determinants of the current production of bones and energy-consuming technological processes in the production of carbon products is the baking process. The main technological stages of the process of baking of carbon products in multi-chamber furnaces are analyzed and the peculiarities of the campaign's progress at these stages are investigated. Parametric analysis of all technological stages of baking is carried out, as a result of which the main input and output parameters are formed, the perturbations and control effects are determined.

Based on the analysis of the baking process, the main role of the stage "camera under fire" as the main stage in terms of the formation of parameters of the quality of finished products and the potential for increasing the efficiency of the resource and energy saving of the process of production of carbon graphite products as a whole was determined.

Increasing the efficiency of the carbon product baking process is based on identifying and implementing in real time the optimum operating modes of the furnace. This task can be solved by implementing effective control systems for this technological object based on its mathematical model. However, control systems of the carbon product baking process known to date do not meet the current requirements for their efficiency, and therefore need to be either improved or developed.

In this regard, the urgent scientific and practical task of developing a system of optimal control of the process of baking carbon products that meets the modern requirements of resource and energy conservation needs to be solved.

The application of the mathematical modeling method as a virtually non-alternative method of investigation of the process of baking graphite production and the objectives of this study are substantiated.

As a result of the analysis of the mathematical models of the baking process known to date, and similar processes, the model was used, on the basis of which further study of the modes of operation of the multi-chamber baking furnace is based.

For mathematical modeling of the campaign of baking carbon products, a mathematical model in distributed parameters is implemented based on the Reynolds-averaged equation of continuity, conservation of the amount of motion, transport of chemical components of the combustion reaction, energy in enthalpy, turbulent kinetic energy and velocity of its energy.

The methodology and procedure for conducting research into the influence of the main technological parameters of the carbon baking process on the campaign progress have been established. The main focus of research on the baking process of "green" blanks in multi-chamber furnaces is to determine: the temperature level of different types of blanks throughout the baking process; optimum in accordance with this design furnace loading blanks; the temperature level of the blanks when heated with flue gases, during combustion of natural gas, when cooled by combustion air; the rate of growth of the minimum and maximum temperatures in the blanks; temperature differences in the blanks and the furnace chamber as a whole; comparison of the temperature level under the arch of the furnace with the temperatures reached in the filling and blanks; the effect of the dilution on the temperature drop across the blanks; the effect of the combustion process on the temperature fields of the furnace chamber; dependence of the processes of combustion of fuel and cooling of the blanks on the coefficient of excess air and, as a result, its effect on the temperature fields of the chamber.

The results of the studies showed a significant distribution of temperatures over the working volume of the multi-chamber baking furnace, allowed to determine the zones

with minimum and maximum temperatures, with maximum temperature difference, as well as factors that affect the thermal mode, which makes it possible to take into account these circumstances when building control systems of process.

It has been shown that a mathematical model of the carbon-baking process used to investigate the modes of operation of a given technological object requires a considerable calculation time - from several hours to several tens of hours - and therefore cannot be used in real-time control systems. The necessity to build a simplified mathematical model, which does not require a long calculation time or significant calculation capacities, and therefore can be used in process control systems, is justified.

The known methods of simplification of mathematical models are analyzed, their advantages and disadvantages are given. Based on the analysis, it is reasonable to use a method based on the approximate representation of exact solutions. A Fourier variable method was used to construct a simplified mathematical model of the baking process. Simplified mathematical models have been developed for the three modes of operation of the chamber - cooling, heating with flue gases and "chamber under fire".

The conducted study of the accuracy and adequacy of the developed models showed their high efficiency. To test the mathematical models developed for the adequacy of the real technological process, experimental data were obtained of the blanks temperatures during the baking campaign and in the simulation of simplified mathematical models. The adequacy of mathematical models was tested using the statistical criteria of Student and Fisher.

An analysis of the existing quality criteria for finished products has shown that it is impossible to use them as the criteria for the finished product readiness. In this paper, it is proposed to consider entropy as a product readiness criterion, on the basis that the change in the state of carbonaceous materials undergoing heat treatment is accompanied by a change in their thermodynamic properties.

The analysis of existing control systems of the baking process has revealed the advantages and disadvantages of the proposed control systems, and also showed that the main difficulties in the development of the control system of this process is the failure

to take into account the air intake, combustion air temperature, inertia of the process and its overregulation.

Ways to solve these difficulties are presented: presenting the control object as a sequence of related stages of the baking campaign, and the expediency of using MPC control. The influence of the horizons of forecasting and control during the development of MPC-controller is investigated.

To study the effectiveness of the developed control system with the MPC controller, a comparison of the latter with a classical PID-controller, tuned by the Ziegler - Nichols method, and a selective PID-controller was performed. The results show that the PID-controller uses the highest fuel consumption during the entire control phase, the average fuel consumption is 54.8 m³ / h for the control system with the classic PID-controller, 49.1 m³ / h with the selective PID-controller, 44.1 m³ / h - for the proposed system with MPC-controller. Obviously, the most cost-effective system is the MPC-controller, which provides fuel consumption of less than 24% and 11%, respectively, compared to other systems under study.

Comparing the results of the above systems, it is found that the classic PID-controller loses all the considered characteristics except the temperature difference during the transition from one mode of operation to another. The closest competing analogue was the selective PID-controller, which has good differential and temperature gains throughout the baking process. Therefore, the advantage is the MPC controller with a sufficiently good rate of change and temperature increase throughout the firing process, a simple implementation of control and the ability to refine the required features by changing the above horizons.

The feasibility of synthesis of control system based on artificial neural networks to solve the problem of determining the defect probability in the blanks is substantiated. The problem of limited necessity for training of neural network of data by application of special structure - autoencoder is solved.

Compared to the control system with the classic PID-controller, the developed system provides less fuel consumption to achieve the products of the required quality.

The proposed controller provides smaller variations and temperature increases throughout the baking process.

The ability to choose the descent step determines the accuracy of the trajectory of the optimal descent, and therefore the accuracy of control of the baking process in the whole control system based on artificial neural networks.

The choice of the optimum descent criterion makes the designed controller flexible when used in different conditions and convenient for achieving different control objectives.

The application of this algorithm at any time, for example, after an emergency, makes it possible to predict the feasibility and effectiveness of continuing the baking campaign.

The developed approach, which underlies this control system, allows to predict the time of the baking campaign and the value of fuel consumption, and therefore to predict the economic efficiency of production.

The efficiency of all the developed control systems is confirmed by the results of the simulations.

Keywords: multi-chamber baking furnace, carbon products, mathematical modeling, simplified mathematical model, control quality criterion, control system with predictive model, control system based on artificial neural networks.

Список публікацій здобувача:

Монографії

1. Жученко О.А., Коротинський А.П., Хібеба М.Г. Математичне моделювання енергоємних технологічних процесів вуглеграфітового виробництва [текст] : монографія. –К.:КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 344 с.:іл. – 300 прим. ISBN 978-617-7503-56-8. *(проведено системний аналіз основних енергоємних процесів, розроблені оперативні математичні моделі, проведені дослідження теплових режимів технологічних процесів методом математичного моделювання)*

***Статті у періодичних наукових виданнях держав, які входять до
Організації економічного співробітництва та розвитку та/або Європейського
Союзу***

2. Korotynskyi A. Investigation influence of predict gorizont of mpc-regulator for control of the baking process/ O. Zhuchenko, A. Korotynskyi // Slovak international scientific journal VOL.2, №37, 2020

***Статті у наукових фахових виданнях України, які входять до
міжнародних наукометричних баз даних***

3. Korotynskyi A. Development and investigation of the reduced mathematical model of the process of baking carbon products / O. Zhuchenko, A. Korotynskyi // Международный наукометрический научный журнал "СхідноЄвропейський журнал передових технологій". – 2019/ -№1/8(97). –С. 70-78. *(включено до наукометричної бази даних Scopus, Index Copernicus). (розроблена математична модель та проведено її дослідження).*

4. Коротинський А.П. Дослідження впливу розрідження на температурний режим процесу випалювання вуглецевих виробів на етапі камера «під вогнем» / О.А. Жученко, А.П. Коротинський // Вісник Криворізького національного університету. Збірник наукових праць. – 2018. - №47. – С. 44-49. *(включено до наукометричної бази даних Index Copernicus). (досліджено вплив розрідження на температурний розподіл процесу випалювання).*

5. Коротинський А. П. Дослідження процесу охолодження у багатокамерних печах випалювання вуглецевих виробів / Жученко О. А., Коротинський А. П. // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки том 29 (68) часть 1 – 2018. *(включено до наукометричної бази даних Index Copernicus). (досліджено температури вуглецевих заготовок, пересипки та газового середовища при різному надлишку повітря).*

6. A system of automated control for the baking process that minimizes the probability of defects / A. Korotynskyi, O. Zhuchenko // Международный наукометрический научный журнал "СхідноЄвропейський журнал передових технологій". – 2020/ -№1/2(103). –С. 58-67. *(включено до наукометричної бази даних Scopus, Index Copernicus).*

даних Scopus, Index Copernicus). (розроблена автоматична система формування оптимальних векторів керування та проведено її дослідження).

Статті у наукових фахових виданнях України

7. Коротинський А.П. Постановка задачі керування процесом випалювання у виробництві вуглецевих виробів / О.А. Жученко, А.П. Коротинський // Гірничий вісник. Науково-технічний збірник. ДВНЗ «Криворізький національний університет». – 2017. - №102. – С. 174-179. (математично сформульована задача оптимального керування процесом випалювання).

8. Коротинський А.П. Дослідження впливу надлишку повітря на процес випалювання вуглецевих виробів у камері "під вогнем" / О. А. Жученко, А. П. Коротинський // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки. - 2018. - № 1. - С. 119-128. (досліджено вплив надлишку витрати повітря на температурні поля процесу випалювання)

9. Коротинський А.П. Дослідження впливу розрідження на процес нагріву багатокамерної печі випалювання димовими газами / О. А. Жученко, А. П. Коротинський // Наукоємні технології. - 2018. - № 2. - С. 255-264. (досліджено вплив розрідження на температурні поля процесу випалювання на стадії нагрівання димовими газами).

10. Коротинський А.П. Дослідження впливу початкової температури повітря на температурний режим процесу випалювання вуглецевих виробів у камері "під вогнем" / О. А. Жученко, А. П. Коротинський // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія : Технічні науки. - 2018. - Вип. 36. - С. 201-209. (досліджено вплив початкової температури повітря на температурні поля процесу випалювання на стадії "камера під вогнем").

11. Коротинський А.П. Дослідження впливу надлишку повітря на процес нагрівання багатокамерної печі випалювання димовими газами / О. А. Жученко, А. П. Коротинський // Енергетика: економіка, технології, екологія. - 2018. - № 1. - С. 71-80. (досліджено вплив надлишку витрати повітря на температурні поля процесу випалювання на стадії нагрівання димовими газами).

12. Коротинський А.П. Дослідження впливу витрати палива на температурні поля печі випалювання вуглецевих виробів / О.А. Жученко, А.П. Коротинський // Збірник наукових праць національного університету кораблебудування імені Адмірала Макарова Наукове видання №4 (478) 2019, С. 3-10.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

13. Коротинський А.П. Аналіз впливу надлишку повітря на температурні поля процесу випалювання вуглецевих виробів / О.А. Жученко, А.П. Коротинський // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2018 [текст]: Матеріали П'ятої Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ-2017), Київ, 11-12 квітня 2018р. КПІ ім. Ігоря Сікорського, Політехніка.-168 с. С. 77-79

14. Коротинський А.П. Дослідження процесу охолодження в багатокамерних печах випалювання / О.А. Жученко, А.П. Коротинський // «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки». Праці VI-ї Міжнародної науковопрактичної конференції. Чернівці: Видавничий дім «Родовід», 2017.– 177с.. 5-8 жовтня 2017р.

15. Коротинський А.П. Дослідження впливу витрати природного газу на температурні поля печі випалювання вуглецевих виробів / О.А. Жученко, А.П. Коротинський// Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології [текст]: Матеріали Шостої Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ-2019), Київ, 23-24 квітня 2019р. – КПІ ім. Ігоря Сікорського, «Політехніка». С. 127-128.

16. Коротинський А.П. Сучасний стан питання розробки систем керування процесом випалювання вуглецевих виробів / О.А. Жученко, А.П. Коротинський// Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології [текст]: Матеріали Шостої Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ-2019), Київ, 23-24 квітня 2019р. – КПІ ім. Ігоря Сікорського, «Політехніка». С. 107-108.

17. Коротинський А.П. Аналіз показників якості випалювання вуглеграфітових електродних виробів / О.А. Жученко, А.П. Коротинський //

Матеріали III Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами», 23 листопада 2016 р. [Електронний ресурс] – К: НУХТ, 2016 р. – 286 с. с. 47

18. Коротинський А. П. Аналіз процесу випалювання вуглеграфітових виробів / Коротинський А.П., Жученко О.А. // Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта) [текст]: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта)» 14-18 листопада 2016 р. К: НУБіП, 2016 р. – 174 с. С 64-65.

19. Коротинський А. П. Задачі керування процесом випалювання / Жученко О. А., Коротинський А. П. // Автоматика – 2017 [текст]: Матеріали XIV Міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика – 2017»:, м. Київ, Україна, 13–15 вересня 2017 року:.. Київ. 2017. 267 с. С 68-69.

20. Коротинський А. П. Дослідження впливу надлишку повітря на процес нагрівання камери печі випалювання димовими газами / Жученко О. А., Коротинський А. П. // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології [Текст]: Тези доповідей XI-ї науково-практичної конференції студентів. Київ, 06–07 грудня 2017 р. [Електронний ресурс] – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 91 с. С 65-66.

21. Коротинський А. П. Аналіз впливу надлишку повітря на температурні поля процесу випалювання вуглецевих виробів / Жученко О. А., Коротинський А. П. // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2018 [текст]: Матеріали V Міжнар. наук.-практ конф. Молодих учених, аспірантів і студ. (АКІТ – 2018), м. Київ, 11-12 квіт. 2018р. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2018. – 168 с. С. 77-78.

22. Коротинський А. П. Аналіз впливу розрідження на процес нагріву багатокамерної печі випалювання / Жученко О. А., Коротинський А. П., Катишев Є. В. // Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та

оптимізації [текст]: Тези доповідей 8-ї Міжнародної наукової конференції, присвяченої 100-річчю Національної академії наук України та 100-річчю Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка «Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації». — Кам'янець-Подільський : Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 2018. — 160 с. С.-26

23. Коротинський А. П. Дослідження впливу початкової температури повітря на температурний режим камери «під вогнем» / Жученко О. А., Коротинський А. П., Катишев Є. В. // Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта) [текст]: Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції присвяченої 120-річчю НУБіП України «Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування» (теорія, практика, історія, освіта) м. Київ, 23-27 травня 2018 р. НУБіП 2018 — 131 с. С.51-53

24. Жученко, О. А. Аналіз впливу способу завантаження заготовок на температурні поля печі випалювання на етапі камера «під вогнем» / Жученко О. А., Коротинський А. П. // Інформаційні технології і автоматизація – 2018 : зб. доп. XI Міжнар. наук.-практ. конф., Одеса, 4–5 жовт. 2018 р. / Одес. нац. акад. харч. технологій ; ред. кол.: С. В. Котлик, В. А. Хобін. – Одеса, 2018. – Ч. I. – С. 43–44 : рис. – Бібліогр.: 2 назв.

25. Коротинський А. П. Дослідження впливу розрідження на етапі камера «під вогнем» процесу випалювання вуглецевих виробів / Жученко О. А., Коротинський А. П. // Автоматизоване управління багатовимірними об'єктами на засадах обчислювального інтелекту [текст]: Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «автоматизоване управління багатовимірними об'єктами на засадах обчислювального інтелекту» 17 - 19 жовтня 2018 року Івано-Франківськ – 2018 — 251 с. С.36-38

26. Коротинський А. П. Постановка задачі використання автоенкодера Для визначення ймовірності браку продукції процесу випалювання / Жученко О. А., Коротинський А. П. // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

[Текст]: Тези доповідей Тринадцятої науково-практичної конференції студентів. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 04–05 грудня 2019 р. [Електронний ресурс]. – 84 с.

27. Коротинський А. П. Дослідження впливу горизонту прогнозування МРС-регулятора при синтезі системи керування процесом випалювання / О.А. Жученко, А.П. Коротинський // Матеріали VI Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами», 20 листопада 2019. [Електронний ресурс] – К: НУХТ, 2019 – 300 с.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	22
ВСТУП.....	23
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ПРОЦЕСУ ВИПАЛЮВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ.....	32
1.1 Технологічний комплекс виробництва вуглецевих виробів	32
1.2 Технологія випалювання вуглецевих виробів	35
1.3. Технологічне обладнання процесу випалювання.....	36
1.4. Показники якості готової продукції процесу випалювання вуглецевих виробів	43
1.5. Аналіз питань математичного моделювання процесу випалювання.....	48
1.5.1. Математична модель нестационарного дифузійного згоряння природного газу в турбулентному потоці.....	51
1.5.2 Модель конвективного теплообміну	58
1.6. Аналіз існуючих систем керування процесом випалювання вуглецевих виробів	59
1.7. Постановка завдань дослідження	68
Висновки до розділу 1	69
Список використаних джерел до розділу 1	70
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ ПРОЦЕСУ ВИПАЛЮВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ.....	77
2.1. Опис умов дослідження	77
2.2. Процес охолодження камери печі.....	80
2.2.1. Розрахунок потрібної для горіння витрати повітря	80
2.2.2. Дослідження охолодження камери печі повітрям, що йде на спалювання ..	82
2.2. Нагрівання камери печі димовими газами	89
2.3.1. Розрахунок витрати продуктів горіння.....	89
2.3.2. Дослідження впливу надлишку повітря на процес нагрівання камери печі димовими газами	91

2.3.3. Дослідження впливу розрідження на нагрівання камери печі димовими газами.....	96
2.4. Нагрівання камери печі при горінні природного газу.....	99
2.4.1. Дослідження впливу розрідження на процес нагрівання камери печі при горінні природного газу.....	100
2.4.2. Дослідження впливу надлишку повітря на процес нагрівання камери печі при горінні природного газу	103
2.4.3. Дослідження впливу початкової температури на процес нагрівання камери печі при горінні природного газу	113
Висновки до розділу 2	117
Список використаних джерел до розділу 2	119
РОЗДІЛ 3. СПРОЩЕНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ВИПАЛЮВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ ТА ЇЇ ДОСЛІДЖЕННЯ	123
3.1. Обґрунтування потреби у розробленні спрощених математичних моделей.	123
3.2. Матеріали і методи спрощення математичної моделі процесу випалювання вуглецевих виробів.....	125
3.2.1. Методика спрощення математичної моделі методом Фур'є	125
3.2.2 Методика оцінювання якості апроксимації.....	126
3.3. Спрощені математичні моделі процесу випалювання	126
3.3.1 Формування оптимальної структури спрощених моделей	126
3.3.2 Ідентифікація залежностей між коефіцієнтами Фур'є та вхідними сигналами.....	129
3.4. Дослідження якості спрощених моделей.....	131
Висновки до розділу 3	140
Список використаних джерел до розділу 3	141
РОЗДІЛ 4 СИСТЕМА КЕРУВАННЯ З ПРОГНОЗУЮЧОЮ МОДЕЛЛЮ	143
4.1. Постановка задачі синтезу системи керування печею випалювання вуглецевих виробів з прогнозуючою моделлю	143
4.2. Синтез МРС-регулятора для процесу випалювання вуглецевих виробів	144
4.2.1. Дослідження впливу горизонту прогнозування МРС-регулятора.....	146
4.2.2. Дослідження впливу горизонту управління МРС-регулятора	153

4.3. Дослідження ефективності системи керування з МРС-регулятором	160
Висновки до розділу 4	164
Список використаних джерел до розділу 4	165
РОЗДІЛ 5 СИСТЕМА КЕРУВАННЯ НА БАЗІ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ	167
5.1. Постановка задачі синтезу системи керування печею випалювання вуглецевих виробів на базі штучних нейронних мереж.....	167
5.2. Розроблення нейромережевого прогнозувача температурних полів.....	169
5.2.1 Підготовка даних для навчання нейронної мережі	169
5.2.2 Вибір архітектури нейронної мережі	170
5.2.3 Навчання нейронної мережі	171
5.2.4 Дослідження ефективності роботи прогнозувача температурних полів.....	172
5.3. Нейронна мережа для визначення дефектів у заготовках.....	173
5.3.1 Визначення ймовірності дефекту із застосуванням автоенкодера	173
5.3.2. Дослідження процесу визначення ймовірності дефекту	176
5.4. Оптимальний спуск	177
5.5. Дослідження процесу визначення ймовірності дефекту.....	179
Висновки до розділу 5	185
Список використаних джерел до розділу 5	186
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	188

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АСК – автоматизована система керування;

ПІД-регулятор – пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор;

RANS – Reynolds averaged Navier-Stokes;

АСУТП – автоматизована система управління технологічними процесами;

САУ – система автоматичного управління;

NN PC – Neural Network Predictive Control;

СКПМ – система керування з прогнозуючою моделлю;

MIMO – Multiple Input Multiple Output;

MPC – Model Predictive Control.

ВСТУП

Розвиток техніки та технології виробництва найважливіших для народного господарства матеріалів багато в чому визначається якістю продукції електродного виробництва. Так, при виплавці сталі, феросплавів, кремнію використовують вуглеграфітові та вуглецеві електроди. При виробництві ряду важливих хімічних продуктів використовують графітовані аноди. В електротермічних печах при отриманні фосфору, карбіду кальцію, абразивних матеріалів використовують електродну масу.

Інтенсифікація процесів виплавки чорних та кольорових металів шляхом нарощування потужності печей і обладнання їх потужними трансформаторами визначає необхідність використання електродних виробів принципово нової якості — вуглеграфітових та вуглецевих електродів великого діаметру, що допускають високу щільність струму та характеризуються високою механічною та термічною стійкістю.

Проте якість вуглецевих виробів не завжди відповідає поставленим умовам, а значна енерго- та ресурсозатратність виробництва через його довготривалість знижує його рентабельність.

Виробництво вуглеграфітових виробів включає ряд технологічних процесів і операцій. На першому етапі здійснюється подрібнення вуглевмісної сировини. Після подрібнення матеріал надходить в прожарювальні печі з температурою прожарювання не нижче температури подальшого випалювання - 850- 1300 °С.

Прожарений матеріал охолоджується і розмелюється з подальшим розсіюванням по фракціям.

Отримана вуглецева маса надходить в пресове відділення, де їй надають необхідну форму. Пресування маси виконують продавлювання через мундштук певної форми або формуванням в закритій матриці.

Після пресування і подальшого охолодження вуглеграфітові вироби піддають випалюванню. Під випалюванням розуміють термічну обробку спресованих

виробів при температурі 850-1300 ° С, при якій сполучний матеріал переходить в кокс і скріплює частки наповнювача.

При необхідності отримання продукції з більш якісними характеристиками після випалювання її піддають просоченню кам'яновугільним пеком, штучними смолами і ін., а після цього повторно випалюють.

Актуальність теми. Процес випалювання вуглецевих виробів є одним із найважливіших етапів електродного виробництва, оскільки саме на цьому етапі вуглецеві вироби набувають ряду кінцевих властивостей продукції. Необхідно відмітити, що піч випалювання є енергозатратним апаратом у всій технологічній схемі виробництва. На її роботу витрачається 30 – 40% всіх енергоресурсів виробництва. Тому навіть незначне зменшення енергозатрат одно даного процесу прозводить до значного зменшення витрат на весь процес виробництва вуглецевих виробів. У зв'язку з цим, відповідно до сучасних світових тенденцій енерго- та ресурсозбереження, постає науково-технічне завдання вдосконалення даного технологічно процесу.

У зв'язку з цим потребує розв'язання актуальна науково-практична проблема розробки системи оптимального керування процесом випалювання вуглецевих виробів, яка б відповідали сучасним вимогам ресурсо- та енергозбереження.

Вирішенню цього питання присвячена велика кількість робіт вітчизняних та закордонних науковців і дослідників. Серед них варто виділити роботи Чалих Є. Ф., Шулєпова С. В., Малахова С. А., Саннікова А. К., стосуються або виключно технології вуглеграфітового виробництва, або його окремих технологічних процесів, або, навіть, окремих питань, які можуть бути пов'язані з даним виробництвом.

Дослідження вітчизняних науковців, таких як Панов Є. М., Карвацький А. Я., Лелека С. В., Пулинець І. В., Кутузов С. В., Лазарєв Т. В., направлені на пошуки ефективних регламентів технологічних процесів, а не розробки систем автоматичного керування.

Технологічна обробка «зелених» виробів у багатокамерних кільцевих печах має ряд негативних показників, що знижують загальну ефективність:

– високий вихід браку, що визначається значним перепадом температур по всьому об'ємові печі.

– суттєва перевитрата палива (на 40-50% від теоретично можливого);

– низький рівень автоматизації процесів випалювання.

Оскільки основним технологічним параметром, що впливає на всі техніко-економічні показники є температура, то дослідження процесу випалювання вуглецевих виробів повинно бути спрямоване саме на дослідження температурних режимів роботи даного об'єкту.

Описані дослідження передбачають проведення натурних експериментів, що фактично неможливо з фінансових причин та вимог безпеки виробництва, а тому, лише методи математичного моделювання можуть бути використані для вирішення даної задачі.

Підвищення ефективності процесу випалювання вуглецевих виробів базується на визначенні та реалізацією у реальному часі оптимальних режимів роботи печі випалювання. Поставлена задача розв'язується шляхом синтезу систем керування даним технологічним об'єктом на основі його математичної моделі. Проте відомі на сьогоднішній день системи керування процесом випалювання вуглецевих виробів не відповідають сучасним вимогам до їх ефективності а тому потребують або їх удосконалення або розроблення нових.

Відтак інтенсифікація випалювання, що базується на зменшенні виходу браку продукції та зменшення енерговитрат є важливою науково-технічною задачею.

На основі аналізу попередніх досліджень та сучасного рівня розвитку науки і техніки одним з найбільш ефективних шляхів розв'язання проблеми підвищення ефективності процесу випалювання вуглецевих виробів є розроблення системи оптимального керування нею, що забезпечить функціонування даного технологічного процесу у режимі ресурсо- та енергозбереження і забезпечить виробництво продукції потрібної якості.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основою дисертаційної роботи є теоретичні і експериментальні дослідження, виконані за

безпосередньої участі автора у відповідності до тематики науково-дослідних робіт кафедри автоматизації хімічних виробництв Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” : науково-дослідної роботи «Теоретичні основи термічної обробки багатокомпонентних вугільних сумішей» (номер державної реєстрації 0106U009676);

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення ефективності процесу випалювання вуглецевих виробів шляхом створення системи керування у відповідності до сучасних вимог ресурсо- та енергозбереження з забезпеченням продукції потрібної якості.

Робота спрямована на вирішення прикладного завдання зменшення енергозатрат при виробництві вуглецевих виробів в багатокамерних печах шляхом розробки системи керування піччю, що забезпечує високоефективну роботу технологічного устаткування за рахунок ресурсо- та енергозбереження.

Досягнення поставленої мети передбачає розв’язання таких наступних завдань:

- проведення аналізу виробництва вуглецевих виробів як складної динамічної системи, який передбачає дослідження загальної технології виробництва, аналіз показників якості вуглеграфітової продукції, дослідження технологічних особливостей процесу випалювання вуглецевих виробів та конструктивних особливостей печей випалювання;

- аналіз існуючих математичних моделей процесу випалювання та схожих типових теплових об’єктів з метою вибору моделей, які у найбільшій мірі достовірно і точно описують дані процеси;

- проведення математичного моделювання теплових режимів роботи багатокамерної печі випалювання з метою дослідження характеру розподіленості температурних полів кожного при різних режимах роботи, вивчення впливу основних технологічних параметрів на перебіг кампанії випалювання, визначення характерних температурних областей досліджуваного об’єкта;

- розроблення спрощених математичних моделей основних етапів процесу випалювання, які можуть бути використані у системах керування реального часу, проведення тестування спрощених моделей та перевірки їх валідності;

- аналіз існуючих систем керування процесом випалювання вуглецевих виробів, а також аналіз техніко-економічних показників, які можуть бути використані, як критерії оптимізації вуглеграфітового виробництва;

- синтез системи керування процесом випалювання вуглецевих виробів та проведення досліджень ефективності запропонованої системи керування, що враховує обмеження на технологічні параметри, керування та показники якості продукції.

Об'єктом дослідження є технологічний процес випалювання вуглецевих виробів у багатокамерних печах закритого типу.

Предметом дослідження є математичні моделі та системи оптимального керування технологічним процесом випалювання вуглецевих виробів.

Методи дослідження:

- метод аналізу інформації щодо автоматичних систем керування технологічними процесами, для обґрунтування актуальності, мети і завдань дослідження;

- методи математичного моделювання для дослідження теплових режимів роботи багатокамерної печі випалювання при різних режимах її роботи;

- методи математичної статистики для перевірки статистичних гіпотез з метою оцінювання адекватності розробленої математичної моделі;

- методи спрощення математичних моделей з розподіленими параметрами, з метою розроблення спрощених математичних моделей.

- методи теорії ідентифікації для побудови спрощених моделей;

- методи аналізу і синтезу систем автоматичного керування для розробки структури та алгоритмів керування;

- методи штучного інтелекту для розробки системи визначення ймовірності дефекту;

– методи імітаційного моделювання для дослідження ефективності запропонованих системи, методик і алгоритмів.

Наукова новизна отриманих результатів. На основі аналізу виробництва вуглецевих виробів як складної динамічної системи обґрунтовані та сформульовані наукові засади побудови системи керування процесом випалювання вуглецевих виробів, яка забезпечує його функціонування у режимі ресурсо- та енергозбереження;

вперше:

проведено ґрунтовне дослідження теплових режимів роботи багатоканальної печі випалювання вуглецевих виробів, результати якого дозволили вивчити характер розподіленості температурних полів, вплив технологічних параметрів на перебіг кампанії випалювання, визначити розташування та характерні особливості температурних областей об'єкта;

– побудовані спрощені математичні моделі основних етапів процесу випалювання вуглецевих виробів, які призначені для розрахунку температурних полів у системах керування реального часу;

– сформовано критерій готовності продукції процесу випалювання вуглецевих виробів з урахуванням технологічних особливостей всіх етапів технологічного процесу;

– запропонована нова система керування процесом випалювання вуглецевих виробів з урахуванням зміни регламенту роботи обладнання і зміни виду продукції;

– розроблено систему прогнозування ймовірності дефекту в продукції шляхом застосування штучних нейронних мереж, що дало можливість розробити автоматичну систему формування векторів оптимального керування процесом випалювання з забезпеченням без дефектності виробів.

удосконалено:

– систему оптимального керування процесом випалювання вуглецевих виробів в багатоканальних печах за рахунок використання керування з прогнозуючою моделлю, ефективність запропонованої системи підтверджено

результатами проведеного дослідження даної системи у порівнянні з системою з класичним ПД-регулятором;

Практичне значення отриманих результатів. Основне практичне значення отриманих результатів полягає у тому, що їх впровадження у виробництво вуглецевих виробів, а саме у процес випалювання вуглецевих виробів, забезпечить підвищення ефективності останнього за рахунок його функціонування у режимі ресурсо- та енергозбереження. Крім того:

- результати проведеного дослідження теплових режимів роботи багатокамерної печі випалювання, можуть бути використанні для побудови інших систем керування даними процесами, а також при розробці нових, більш гнучких технологічних регламентів ведення процесу;

- на основі розроблених у дисертації алгоритмів керування створено програмне забезпечення комп'ютерних систем оптимального керування процесом випалювання вуглецевих виробів;

- запропонована система оптимального керування процесом випалювання забезпечує функціонування апарату у режимі ресурсо- та енергозбереження із збереженням високих показників якості готової продукції та може бути застосована для багатокамерних печей інших виробництв де пред'являються жорсткі умови щодо дотримання певного графіку зміни температур;

- наведена у дисертації методика визначення ймовірності дефекту у виробі може бути використана для розрахунку собівартості одиниці вуглеграфітового виробу;

- розроблена система автоматичного керування забезпечує функціонування апарату у режимі ресурсо- та енергозбереження із збереженням високих показників якості готової продукції;

- матеріали дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі кафедри «Автоматизації хімічних виробництв» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського».

Особистий внесок здобувача. Дисертація є завершеною науковою працею автора. Основні наукові ідеї, результати теоретичних та експериментальних досліджень розроблені і сформульовані автором особисто.

Автором сформульована задача оптимального керування процесом випалювання вуглецевих виробів в залежності від умов ринку та енергозатратності. Проведено дослідження впливів основних технологічних параметрів на температурні поля касети печі випалювання, а саме надлишку повітря, величини розрідження, витрати палива, температури повітря та палива, що йде на подальше горіння і т.п.. Здійснена побудова та дослідження спрощених математичних моделей ключових етапів кампанії випалювання, що можуть бути використані при розробці системи керування в реальному часі, проведено дослідження якості їх роботи. Проведено дослідження впливу основних параметрів МРС-регулятора на особливості керування процесом випалювання.

Автором розроблений новий метод на основі штучних нейронних мереж діагностування або прогнозування наявності дефектів в заготовках, що випалюються. Проблема обмеженості даних необхідних для навчання було запропоновано вирішити за допомогою переднавчання автоенкодера. На базі даного методу розроблена система автоматичного формування векторів оптимального керування, відповідно до поставленої умови оптимальності.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційного дослідження оприлюднено й обговорено на наукових форумах – міжнародних, всеукраїнських і регіональних з'їздах, конференціях, семінарах, круглих столах. Основні з них: Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2018, 4 Міжнародна науково-практична конференція молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ2017), (Київ, квітень 2017р.); Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2018, 5 Міжнародна науково-практична конференція молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ2017), (Київ, квітень 2018р.); Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання, Міжнародна науково-практична конференція. (м. Івано-Франківськ, травень 2017р.); Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології 6 Міжнародна науково-практична

конференція молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ-2019). (Київ, квітень 2019р.); Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами III Міжнародна науково-технічна Internet-конференція (Київ, листопад 2016); Автоматика – 2017 XIV Міжнародна конференція з автоматичного управління «Автоматика – 2017»:, (Київ, вересень, 2017); Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта) VII Міжнародна науково-технічної конференції присвяченої 120-річчю НУБіП України (Київ, травень, 2018) Автоматизоване управління багатовимірними об'єктами на засадах обчислювального інтелекту, Всеукраїнська науково-практична конференція (Івано-Франківськ, жовтень, 2018).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 27 наукових роботах, в тому числі 1 монографії; 11 статей у провідних фахових виданнях, з яких – 10 у виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз даних та 1 – у виданнях країн Європейського Союзу; 15 тез доповідей.

Структура роботи. Дисертація складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків до кожного з розділів, списку використаних джерел до кожного з розділів зі 130 найменувань. Загальний обсяг дисертації становить 190 сторінок, у тому числі 150 сторінок основного тексту, 100 рисунків та 31 таблиць.

РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ПРОЦЕСУ ВИПАЛЮВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

1.1 Технологічний комплекс виробництва вуглецевих виробів

Первинною сировиною для отримання електродних заготовок є продукти нафтової і кам'яновугільної промисловості: піролізні і крекінгові нафтові кокси, пекові кокси, кам'яновугільні пеки і смолопеки [1].

На стадії виробництва монолітної вуглеграфітової продукції кокс використовується як наповнювач, а як сполучний і просочуючий матеріал – кам'яновугільні пеки з різними температурами розм'якшення і смолопеки. За температурою розм'якшення пеки поділяються на м'які, середні і тверді. Найбільшого поширення у виробництві вуглеграфітової продукції отримали середньо і високотемпературні пеки [2].

Виробництво вуглеграфітових виробів включає ряд технологічних процесів і операцій, які представлені на рис. 1.1. На першому етапі здійснюється подрібнення вуглевмісної сировини. Розмір шматків при подрібненні матеріалу наповнювача може досягати 40-45 мм. Після подрібнення матеріал надходить в прожарювальні печі з температурою прожарювання не нижче температури подальшого випалювання – 850-1300 °С. При прожарюванні з наповнювача видаляється волога і леткі речовини, збільшується його щільність, механічна міцність, електропровідність, теплопровідність і термостійкість, змінюється структура речовини [3-6].

Прожарений матеріал охолоджується і розмелюється з подальшим розсіюванням по фракціям. Після розсіювання сировина надходить в сортові бункери. З них певну кількість кожної фракції наповнювача і сполучного подають в змішувачі. Фізичні властивості одержуваних вуглеграфітових виробів в значній мірі залежать від складу суміші, тому кожен вид продукції має свою рецептуру суміші [7-9]. Шихта в змішувачах перемішується протягом 1-5 год. Температура маси в процесі перемішування підвищується до рівня 125-150 °С.

Отримана вуглецева маса при необхідності охолоджується і надходить в пресове відділення, де їй надають необхідну форму. Пресування маси виконують продавлювання через мундштук певної форми або формуванням в закритій матриці. Вироби після пресування мають температуру близько 80 °С. Для запобігання деформації під дією власної ваги їх охолоджують у водяному середовищі до затвердіння [10, 11].

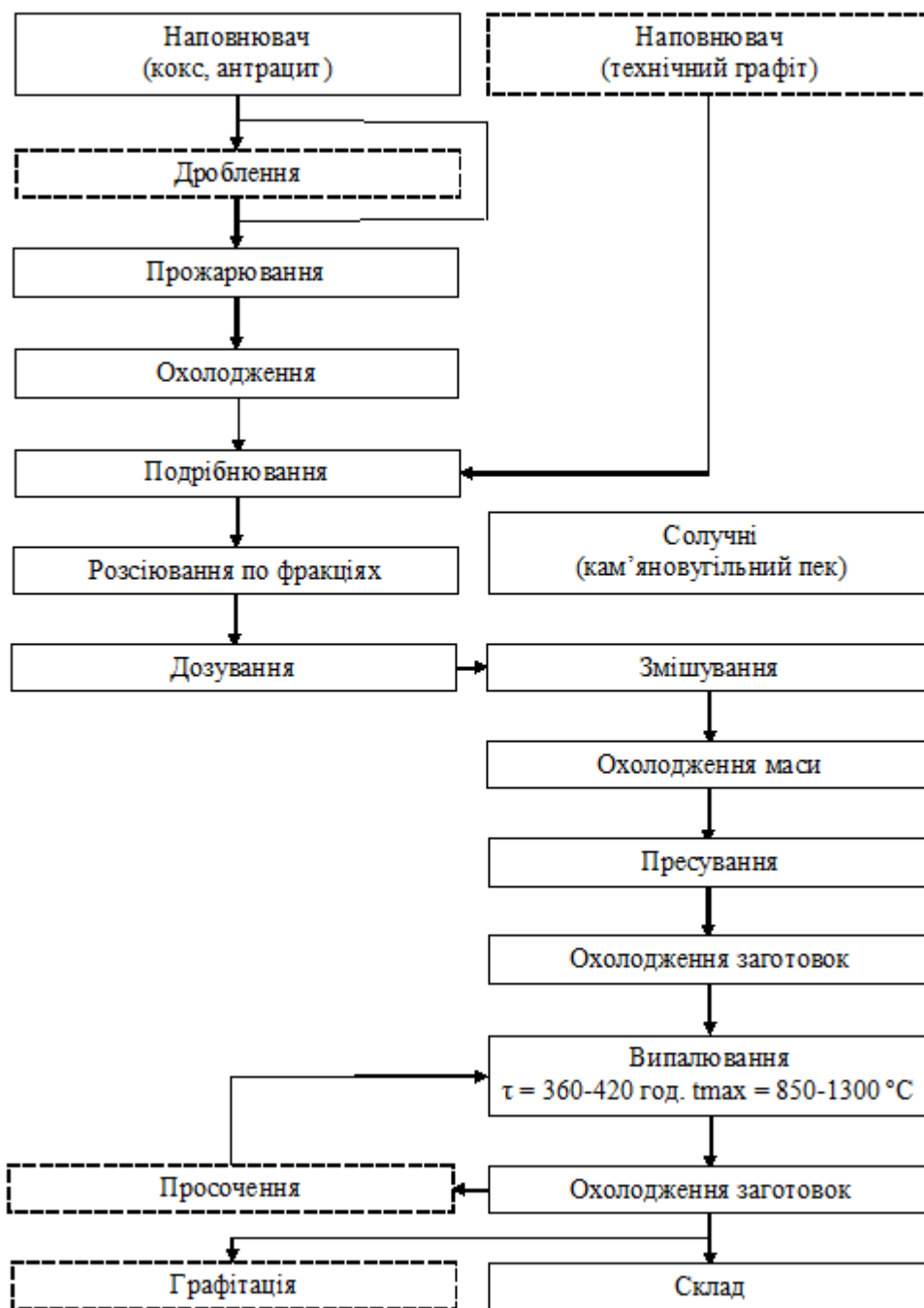


Рисунок 1.1. Технологічна схема виробництва вуглеграфітової продукції

Від способу і характеристик пресування сильно залежать такі фізичні властивості електродної продукції як щільність, електро- і теплопровідність, механічна міцність [12]. При пресуванні в заготовках виникає текстура, яка не зникає навіть після високотемпературної обробки і позначається на тому, що електродні вироби мають різні теплофізичні і механічні властивості (тобто характеризуються анізотропією) в залежності від напрямку по відношенню до осі пресування [13].

Після пресування і подальшого охолодження вуглеграфітові вироби піддають випалюванню. Під випалюванням розуміють термічну обробку спресованих виробів при температурі 850-1300 ° С, при якій сполучний матеріал переходить в кокс і скріплює частки наповнювача. Випалювання заготовок здійснюється в печах різних конструкцій [14]. Технологія випалювання змінюється в залежності від конструкції печі. Незважаючи на конструктивні відмінності печей випалювання, основні технологічні операції є схожими для всіх типів печей: підготовка і завантаження, випалювання заготовок, охолодження і вивантаження [4].

Підготовка печі до роботи полягає в її очищенні та профілактичному ремонті конструкції. Завантаження печі починається з засипання в обсяг касет камер печі шару пересипки, товщиною 100 ± 25 мм. далі встановлюються заготовки паралельно між собою, відстань між ними регулюється в залежності від їх розмірів і схеми завантаження. Проміжки між заготовками заповнюються пересипкою на 100-150 мм вище торців заготовок. Далі камера печі закривається теплоізоляційним укриттям - склепінням печі. Випалювання здійснюється в печах за рахунок теплоти згорання палива. Вивантаження випалених виробів здійснюється після повного охолодження камери печі. Після вивантаження придатні вироби піддають механічному очищенню від частинок пересипки, які спеклися або прикоксувалися.

При необхідності отримання продукції з більш якісними характеристиками після випалювання її піддають просоченню кам'яновугільним пеком, штучними смолами і ін., а після цього повторно випалюють.

1.2 Технологія випалювання вуглецевих виробів

Випалювання є однією з технологічних стадій виробництва вуглеграфітової продукції. Після випалювання вироби набувають механічної міцності, збільшується їх тепло-і електропровідність, покращуються також і інші властивості.

Під випалюванням розуміють процес термічної обробки спресованих матеріалів при температурі до 1300 °C, метою якого є перетворення сполучних речовин спресованого виробу у кокс. Це перетворення відбувається в результаті нагрівання виробів до високої температури [15].

Механізм випалювання полягає у наступному. Спресовані, «зелені» вироби представляють собою гетерогенну систему, що складається з вуглецевих зерен, між якими знаходяться шари пеку. Пек утворює перехідні шари між частинками. При нагріванні відбувається термічна деструкція сполук, що входять у склад пеку, кокс, що утворюється при цьому, скріплює в єдиний моноліт вуглецеві зерна. Таким чином, створюється коксова решітка, яка наділяє виріб рядом фізичних властивостей [15].

Випалювання вуглеграфітових матеріалів можна розділити на наступні стадії:

- розм'якшення пресованих виробів, плавлення сполучного матеріалу ($T = 40-200\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- видалення адсорбованих компонентів: води, оксидів вуглецю, легких масел, які можуть перебувати у стані хімічного зв'язку з сполучними компонентами;
- процеси поліконденсації (взаємодії функціональних груп при $T = 100-300\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- піроліз і молекулярна асоціація сполучного матеріалу, створення напівкоксу і пекового коксу;
- структурна перебудова хімічних зв'язків між матеріалом і вуглецевими частинками ($T = 300-750\text{ }^{\circ}\text{C}$);

- видалення сторонніх атомів і сполук з периферії;
- молекулярна перебудова і ущільнення коксу сполучного матеріалу ($T = 750-1300\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- охолодження випалених виробів [15].

1.3. Технологічне обладнання процесу випалювання

Особливості процесу випалювання висувають свої вимоги до конструкції печей випалювання, основні з яких наступні: випалювання повинне проводитися у відновлювальному або нейтральному середовищі, випалювання повинне виключати деформацію виробів під дією власної ваги при нагріванні, випалювання повинне забезпечити оптимальний режим нагрівання заготовок (підводу теплоти) [15].

Основною умовою якісного проведення процесу є забезпечення непрямого обігрівання виробів через стінку. Однак у переважній більшості випадків цього недостатньо. Додатково у камеру, що обігрівається вводять так званий пакувальний матеріал (засипку), який захищає виріб від окислення, деформації, більш рівномірно розподіляє температурне поле в обсязі камери, зменшуючи тим самим градієнт температури, впливає на склад і тиск газової атмосфери у печі [15].

Всі печі, в яких на даний момент відбувається випалювання вуглецевої продукції, можна розділити на два класи за видом теплоносія: полум'яні та електричні [3].

За принципом дії печі випалювання можна розділити на періодичні та безперервної дії. До печей періодичної дії відносяться електричні та муфельні печі, а також печі деяких інших конструкцій. До печей неперервної дії можна віднести багатокамерні та тунельні печі [3].

У світовій практиці виробництва електродної продукції у даний час використовують печі випалювання декількох типів: багатокамерні печі [16-33], печі з вкатним подом для випалювання великогабаритних заготовок в

індивідуальних, а малогабаритних - у групових контейнерах з прямим нагрівом їх газами, тунельні, електричні [34].

Печі з викатним подом (для контейнерного випалювання продукції) і тунельні печі (для випалювання просоченої продукції) застосовують в останні 25-30 років. У порівнянні з багатокамерними касетними печами ці пристрої відрізняються зниженою тепловою інерцією, дозволяють більш повно спалювати летючі речовини, що дає можливість отримувати значну економію палива (табл. 1.1) [16].

Таблиця 1.1 Характеристики печей при випалюванні великогабаритних заготовок

Характеристика печі	30-камерна, не спеціалізована	26-камерна, спеціалізована	Піч з викатним (викочуваним) подом	Тунельна піч
Питома витрата палива МДж/т	10,48	3,35-4,19	3,14-3,35	2,75-3,35

Сумарне завантаження однієї печі з викатним подом - 160 т зелених заготовок. Випалювання ведеться у контейнерах з жароміцної сталі. Як пересипка використовується нафтовий кокс. Температура випалювання - близько 850 °С, тривалість 360 год. Температура випалених заготовок при вивантаженні - 500 °С, температурний перепад по висоті заготовки не більше 15 °С. У верхній частині печі встановлені вентилятори для перемішування газів і вирівнювання температурного поля, газові пальники встановлені з 2-х сторін печі. Утилізація тепла відсутня, температура газів, що відходять після допалювання, коливається у діапазоні 400 - 1000 °С [16].

Тунельні печі працюють за безперервним графіком. Тривалість кампанії випалювання - 270 годин. Піч має 20 температурних зон. У верхній частині печі змонтований димохід, у торці якого встановлений пальник, а до кожної температурної зони підведений індивідуальний газохід з регульованим клапаном [16].

Заготовки випалюються в індивідуальних касетах. Касета встановлюється на візок для зручності пересування по тепловим зонам. У кожній зоні може перебувати тільки один візок. Точність підтримки температурного поля по висоті

камери досягається за рахунок використання вентиляторів. Значення температури по зонах наведено у табл. 1.2.

Таблиця 1.2 Значення температури по зонах

№ зони	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Температура °C	150	175	203	232	265	295	325	355	385	415
№ зони	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Температура °C	445	475	505	535	565	620	690	760	830	850

Основну кількість (до 70%) тепла дають гази, що виділяються при випалюванні самих електродів. У печі проводиться їх повне згоряння до CO_2 . Необхідно зазначити, що зі збільшенням діаметра заготовок питома витрата газу знижується на 20-30% [16].

Відсутність засипки між контейнерами та безпересипкове випалювання просочених заготовок у тунельних печах забезпечує значну економію засипкових матеріалів, а також різко знижує трудомісткість операцій чищення випаленої продукції [16].

Для випалювання спеціальної вуглеграфітової продукції невеликого перерізу, вимоги до якості якої особливо високі, використовуються електричні випалювальні печі. До їх переваг можна віднести високу стабільність нагріву заготовок, безпересипкову технологію випалювання. Висока собівартість випалювання у порівнянні з газовими печами робить їх неприйнятними для промислового випалювання заготовок великого перерізу [34].

Багатокамерні печі по сукупності переваг перевершують печі інших конструкцій. Для промислового випалювання вуглеграфітових виробів застосовують багатокамерні кільцеві печі відкритого (в основному для випалювання анодів) і закритого типу (для випалювання заготовок електродів великого перерізу). За багато років експлуатації печі даного типу зазнали значних конструктивних змін, спрямованих в основному на зменшення перепаду температур за висотою робочого об'єму камер, зниження теплової інерції. У таких печах газ спалюється за допомогою пальників, вмонтованих у край склепіння з боку руху «вогню», з напрямком факела у вогневі колодязі, що служать для

переходу продуктів горіння з попередньої камери у наступну. Звуження касет, спеціалізація печей на один типорозмір заготовок дозволили не тільки механізувати процес обслуговування і у значній мірі інтенсифікувати випалювання, але і збільшити продуктивність печей (табл. 1.3).

Типова багатокамерна піч складається з розташованих у два ряди прямокутних камер, з'єднаних між собою на торцях радіальної системою газоходів – вогневими каналами [16].

Загальний вид багатокамерної печі випалювання зі знімним склепінням конструкції RIEDHAMMER представлений на рис. 1.2.

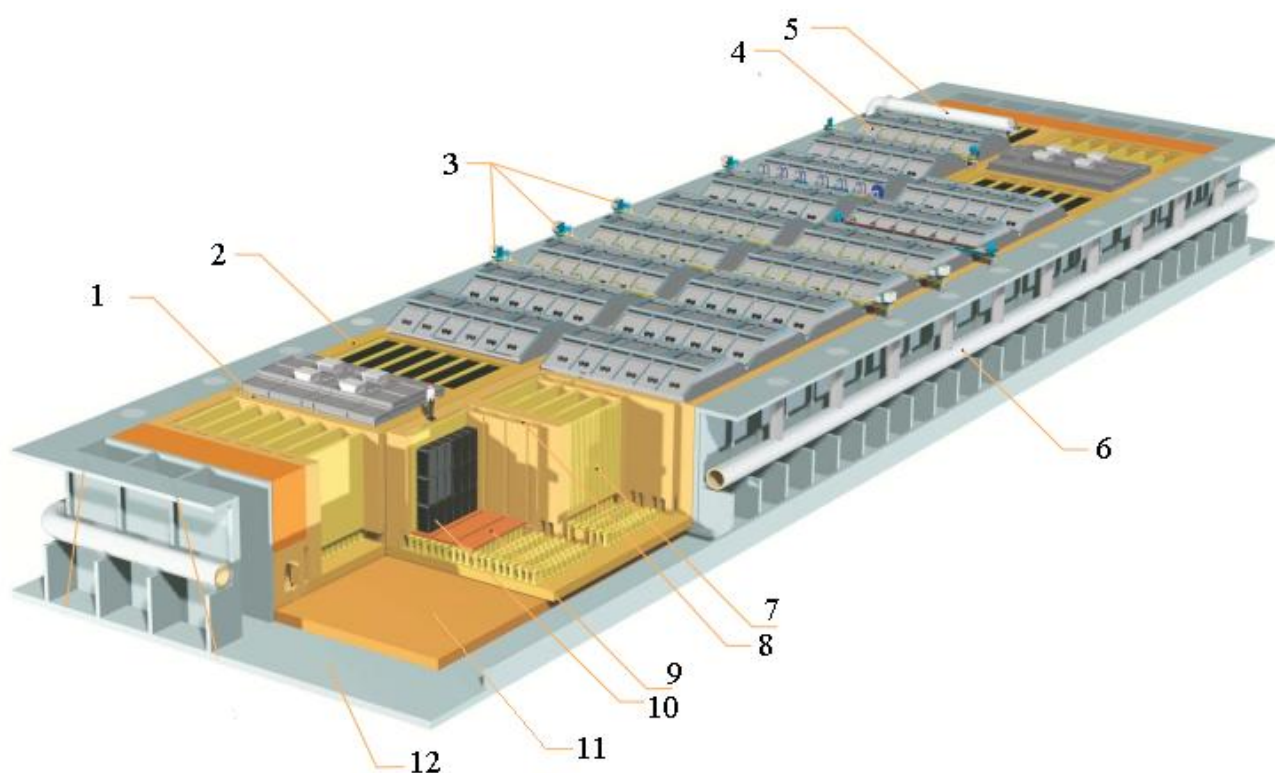


Рисунок 1.2. Конструкція печі RIEDHAMMER для випалювання вуглеграфітової продукції:

1 – камера з касетами; 2 – пересипка; 3 – рампи з пальниками; 4 – склепіння; 5, 6 – обладнання для відведення і транспортування димових газів; 7, 8 – торцеві і бічні муфельні канали; 9 – подина; 10 – заготовки; 11 – цегляна кладка; 12 – бетон.

Щоб розглянути роботу багатокамерної печі, скористаємося схемою процесу випалювання групи камер, зображених на рис. 1.3. Розглянемо випадок, коли рампи з пальниками встановлені на камерах 7, 8 (рис. 1.3.). Газ змішується з

повітрям або з димовими газами, які проходять через камери 9 і 8, відповідно, і згоряє під склепінням і в вогневих каналах камер 7, 8. Отже, в камерах 7, 8 підтримується максимальна температура процесу або, як прийнято на виробництві, камери знаходяться «під вогнем». Продукти згоряння не відводяться відразу у димову трубу, а проходять через ряд камер 3-6 і підігрівають завантажені у них вуглеграфітові вироби, і таким чином охолоджуються. Димові гази, що відходять, повинні проходити через таку кількість камер, щоб їх температура знизилася до 160-200 °С і подальше використання їх стало недоцільним [4].

Потрібне для спалювання газу повітря проходить попередньо через камеру 9, в якій знаходяться вже обпалені електродні заготовки з досить високою температурою (до 1000 °С). Таким чином повітря для спалювання природного газу нагрівається і подається до камери 8 з температурою 250-350 °С. При збільшенні кількості охолоджувальних камер до чотирьох температура повітря, що підігрівається, також підвищується і може досягати 600-800 °С [14].

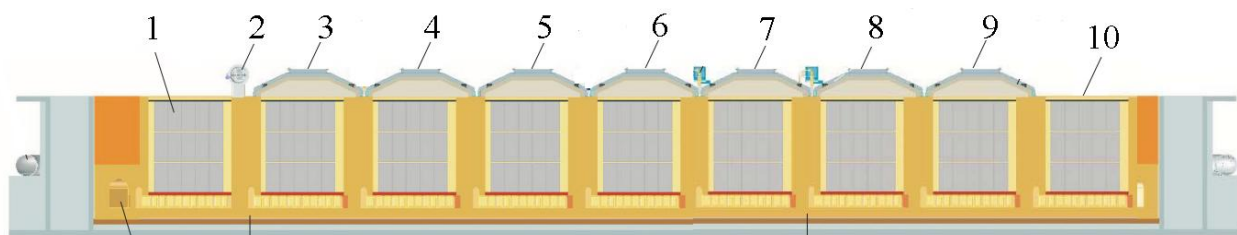


Рисунок 1.3. Схема випалювання заготовок у багатокамерній печі закритого типу:

1 – камера на завантаженні; 2 – обладнання для відведення димових газів; 3-6 – камери, які підігріваються димовими газами, що відходять 7, 8; – камери «під вогнем»; 9 – камера на охолодженні; 10 – камера на розвантаженні.

По завершенню випалювання подача газу припиняється, і рампа з пальниками переставляється на наступну камеру у напрямку руху димових газів. При цьому камера 9 буде відключена від групи камер, задіяних у процесі, тому що вона вже досить охолоджена і буде поставлена на розвантаження, а камера 1, яка тільки що завантажена, буде підключена до групи камер. На рис. 1.4 показана схема руху газів в розрізі камери печі випалювання [7].

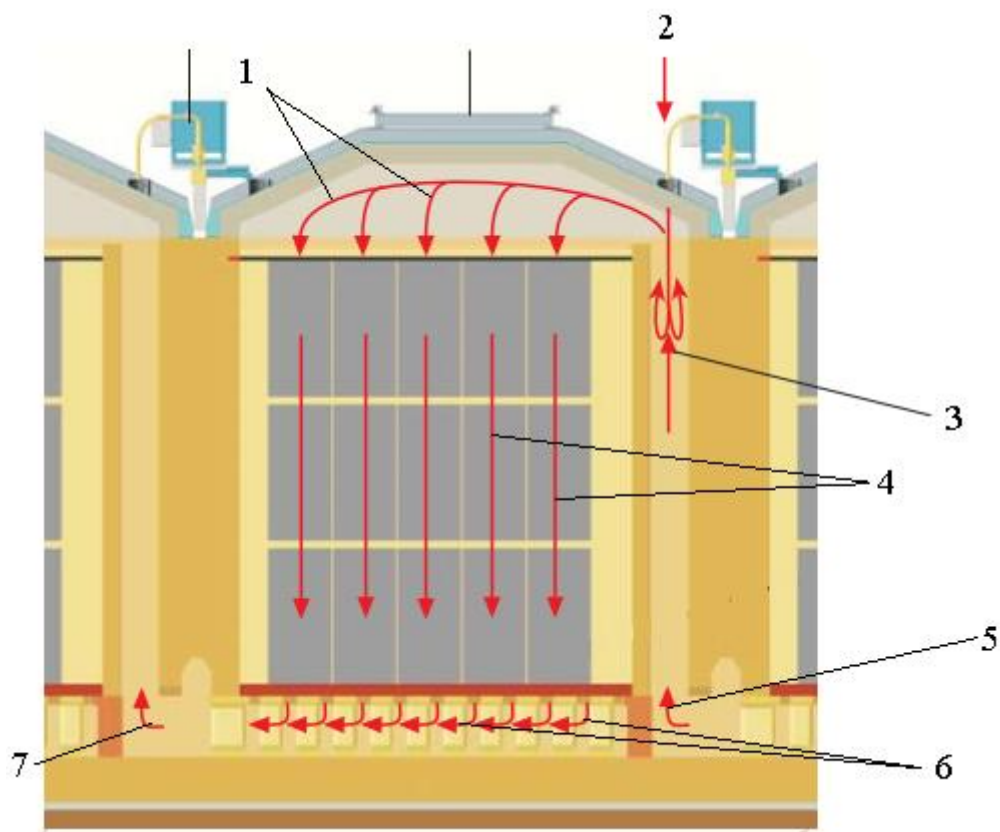


Рисунок 1.4 Схема руху газів у камері печі випалювання:

1 – гарячі димові гази під склепінням; 2 – подача природного газу; 3 – горіння; 4 – гарячі димові гази у муфельних каналах; 5, 7 – нагріте повітря і димові гази відповідно; 6 – рух димових газів під подиною.

Згоряння природного газу здійснюється під склепінням печі і у вогневих колодязях. Димові гази з простору під склепінням камери печі надходять через муфельні канали під подину камери. Далі димові гази через вогневі колодязі потрапляють у наступну камеру. Рух димових газів забезпечується димососом [35].

Кількість повітря, що подається на горіння, визначається в основному, розрідженням у печі. Чим більше розрідження, тим більше поступає гарячого повітря у камеру. Це обмежує можливість управління тепловим режимом печі. У табл. 1.3. наводиться наближений розподіл температур і розріджень по камерах печі [3].

Таблиця 1.3 Розподіл температур і розріджень по камерах печі

Камери	вогнева	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t, ^\circ\text{C}$	1300	1080	830	680	560	430	340	260	180	110

Па/9,80665	0,5-1	1,2	2,5	4	5,6	7,2	9,8	12,5	18,3	23,2
------------	-------	-----	-----	---	-----	-----	-----	------	------	------

Розрідження повинно бути таким, щоб газу, які протягуються через піч, могли досягти потрібної швидкості для подолання сили тертя при проходженні через ряд камер та всі борови. Крім того, газу, що відходять, віддаючи тепло у камерах, покидають піч з порівняно низькою температурою, із-за чого природна тяга може виявитись недостатньою. Для нормальної роботи печі потрібне штучне розрідження. Розрідження безпосередньо за піччю повинно бути не менше $60 \cdot 9,80665$ Па [3].

Таким чином, у багатокамерних печах використовується тепло продуктів горіння, що відходять, та тепло заготовок, що охолоджуються. З розглянутої схеми роботи печі видно, що вироби весь час знаходяться у стані спокою, а зміщується у ході випалювання «вогонь» [3].

Протягом одного циклу кожна камера проходить стадію попереднього підігріву газу, що відходять, потім стадію випалювання і наприкінці охолодження повітрям, яке йде на спалювання [3].

Переміщення зон підігрівання, випалювання та охолодження відбувається переривчасто, проміжок часу між переміщенням зон підігрівання, випалювання та охолодження називають темпом випалювання [3].

У табл. 1.4 наведені порівняльні технічні дані сучасних багатокамерних печей розробки НВК (Науково-виробничий комплекс) «ВАМИ» (м. Санкт-Петербург) і фірми RIEDHAMMER (Німеччина) [36].

Таблиця 1.4 Порівняльні характеристики багатокамерних печей

Характеристика печі	RIEDHAMMER	НВК «ВАМИ»
Число камер, шт.	28	30
Число вогнів, шт.	2	2
Число димоходів, шт.	2	2
Розмір касети, м.	3,8*0,76*4,05	3,82*0,85*4,3
Число касет в камері, шт.	6	5
Об'єм камери, м ³ .	70,2	70
Число мостиків з пальниками на вогонь, шт.	2	3-5
Число пальників на мостику, шт.	1-2	5
Продуктивність печі по	22,4	20

завантаженні, т/м ² *год.		
Питома витрата палива, МДж/т.	7-8	6,5-7,5

Недоліком багатокамерних випалювальних печей є обмежена можливість регулювання кількості теплоносія, що входить у піч. Отже, камери, що знаходяться далеко від «вогневої камери», отримують мало тепла. Це знижує швидкість підйому у них температур. Особливо повільно йде нагрівання заготовки до температури 250 °С. Тривале знаходження заготовок у камері при низьких температур сприяє видаленню сполучного матеріалу і тим самим погіршенню якості продукції.

1.4. Показники якості готової продукції процесу випалювання вуглецевих виробів

На сьогоднішній день існує велика кількість визначення випалювання, що сильно ускладнює формування умов завершення даного процесу та критерію якості для конкретного процесу, а саме, виробництва вуглеграфітових виробів.

Відповідно до випалювання у вуглехімії [37] — процес, в якому вуглисті зв'язуючі матеріали, зазвичай кам'яновугільний смоляний пек або нафтовий пек, як частина сформованої вугільної суміші, перетворюється у вуглець, даючи при повільному нагріванні тверде вуглецеве тіло. Кінцева температура випікання, залежно від сорту вугілля, витримується в межах 1100-1500 К.

Випалювання - нагрівання і витримка при високій температурі (в печах) різних матеріалів для надання їм необхідних властивостей або видалення домішок [38].

Випалювання - теплова обробка матеріалів або виробів з метою зміни (стабілізації) їх фазового і хімічного складу і/або підвищення міцності і щільності, зниження пористості [39].

Випалювання є однією з найбільш важливих операцій технологічного циклу виробництва вуглеграфітових виробів, які виготовляють методом пресування електродної маси, що складається з наповнювача (вуглецевого матеріалу) і сполучного матеріалу (пеку). Метою випалювання є термічна обробка заготовок

при температурах 900-1300 °С, в процесі якої підвищується механічна міцність матеріалу заготовок, електро- і теплопровідність [40].

Під випалюванням розуміють процес термічної обробки пресованих заготовок, що призводить до спікання частинок порошку наповнювача коксом сполучного матеріалу. Як видно з визначення, основним при випалюванні вуглецевих пресованих заготовок є формування з сполучного матеріалу цементуючої коксової решітки. При цьому відбувається термічна деструкція сполучного матеріалу, синтез з нього напівкоксу і подальше перетворення його в кокс, що зв'язує в єдине ціле частки вуглецевого наповнювача. Утворений в результаті спікання матеріал являє собою агломерат вуглецевих частинок, скріплених коксом сполучного матеріалу [14].

Відповідно до технології виробництва вугільної продукції один з процесів, що передують випалюванню – кальцинація, головною задачею якої є видалення вологи та летючих(летких) речовин [16;4-6]. В такому випадку зрозуміло, що для процесу виробництва вуглеграфітових виробів недоцільно характеризувати випалювання як процес видалення домішків у вигляді летючих (летких). Авторами досліджень процесів, що проходять при випалюванні «зелених» заготовок [41] описано, що інтенсивне виділення летючих відбувається при температурах 350-480 °С. Схожі результати були отримані у роботі [42], однак дане дослідження показує, що швидкість газовиділення після інтенсивного газовиділення, орієнтовно 600 °С, аналогічна до швидкості газовиділення до інтенсивного газовиділення орієнтовно 300 °С. Отримані результати підтверджують доцільність відмови від визначення випалювання, як складової процесу виробництва вуглеграфітових виробів, як процесу видалення домішок у вигляді летючих, а тому і не можливе використання факту видалення домішок як критерію закінчення процесу.

З опису фізико-хімічних процесів під час випалювання «зелених» заготовок відомо, що при температурах понад 650 °С в заготовках тривають процеси ущільнення структури коксу, утвореного із сполучного матеріалу. Матеріал заготовок ущільнюється, зростає його механічна міцність, електро- і

теплопровідність [40]. Очевидно, що відсутність у визначеннях узгодженості кінцевої температури обробки матеріалів, що випалюються приводить до неможливості використання температури як критерію закінчення процесу, а оскільки фізико-механічні властивості матеріалів в основному залежать від теплового режиму, а саме кінцевої температури та часу витримки, то це ще раз підтверджує неможливість використання необхідних властивостей виробів як критерію ведення процесу.

Враховуючи, що процес випалювання не є кінцевим у процесі виробництва вуглеграфітових виробів, а лише підготовчим для процесу графітування, при якому вироби і набувають своїх кінцевих властивостей, то досить складно сформулювати конкретні фізичні властивості, які б характеризували завершення процесу випалювання. Відсутність можливості вимірювати фізичні властивості виробів у процесі ведення кампанії випалювання підтверджує неможливість використання конкретних фізичних властивостей виробів згідно держстандарту як критерію керування процесом.

У зв'язку з наведеним вище та відповідно до аналізу у роботі [43], як критерій якості продукції пропонується розглядати ентропію. Зміна стану вуглецевих матеріалів, що піддаються термічній обробці, супроводжується зміною їх термодинамічних властивостей. Зокрема, такі зміни в процесі випалювання будуть відбуватись з ентропією. Причому зміна ентропії визначається лише початковим і кінцевим станами вуглецевої речовини і не залежить від шляху переходу з одного стану в інший.

Ентропія є адитивною величиною. Згідно зі статистичною термодинамікою [40], вона може розглядатися як сума доданків. Залежно від стану системи і характеру завдання ті чи інші складові ентропії можуть зникати зовсім або їх просто не беруть до уваги. Природно, що так чинять лише в тому випадку, коли ці складові або малі, або їх величина залишається незмінною при переході системи з одного фіксованого стану в інший.

Ентропія твердого тіла, що складається з двох складових - конфігураційної і вібраційної може бути представлена у вигляді[40]:

$$S = S_{\text{конф}} + S_{\text{вібр}} ,$$

де, $S_{\text{конф}}$ характеризує досконалість кристалічної структури твердого тіла, чим більша структурна розпорядкованість, тобто чим менш досконала структура твердого тіла, тим більше його ентропія. Відповідно можна зробити висновок, що кампанія випалювання вуглецевих виробів є процес, що йде в кінцевому підсумку зі зниженням ентропії (див рис. 1.5).

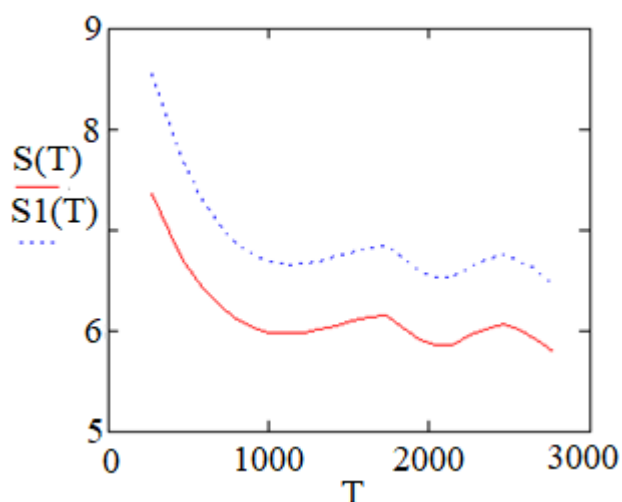


Рисунок 1.5. Графік зміни ентропії при температурі обробки 1473 K та 1573 K

Таким чином, ентропія системи виступає як показник хаотичності розташування атомів вуглецю в вуглецевих речовинах: чим менше ентропія матеріалу, тим більш досконала його структура.

Якщо зменшення ентропії можна пов'язати з зростанням впорядкованості структури матеріалу, то її зростання вимагає вже іншого трактування. Ймовірно, підвищення ентропії вуглецевого матеріалу на передкристалізаційній стадії можна пов'язати з виникненням і формуванням наступної (турбостратної) структури і процесами видалення гетероатомів з оброблюваної вуглецевої речовини[40].

Відповідно до вище сказаного, якщо процес випалювання приймається як початок передкристалізаційної стадії, то зміна знаку зміни (приросту) ентропії з плюса на мінус буде характеризувати початок передкристалізаційної стадії, де тільки починається зростання впорядкованості структури. Тоді критерій якості набуває вигляду:

$$\begin{cases} 1, \Delta S(T_{\text{обр}}, T) \leq 0 \\ 0, \Delta S(T_{\text{обр}}, T) \geq 0 \end{cases}$$

де S – ентропія, T – поточна температура, $T_{\text{обр}}$ – кінцева температура обробки.

Задача визначення перехідного значення ентропії зводиться до пошуку локального максимуму на площині ентропії (див. рис. 1.6.) при відомій кінцевій температурі обробки.

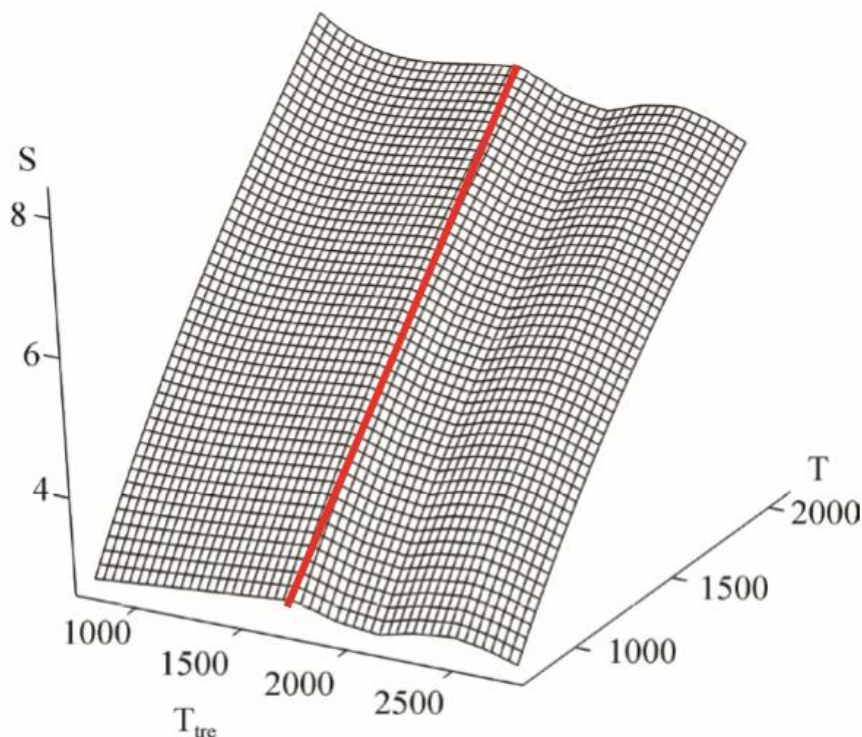


Рисунок 1.6. Площина ентропії в залежності від температури обробки та поточної температури матеріалу

де S – ентропія, T – поточна температура, $T_{\text{обр}}$ – кінцева температура обробки.

Ентропія тіла обчислюється відповідно до рівняння [40]:

$$S = S_0 + \int_0^T \frac{c_p}{T} dT$$

де c_p - теплоємність, T - температура, S_0 - залишкова ентропія.

Якщо за початок відліку ентропії прийняти ентропію речовини при стандартних умовах, то рівняння перетвориться до виду.

$$\Delta S_T^0 = \int_{298}^T \frac{c_p}{T} dT$$

$$S_{298}^0 = \int_0^{298} \frac{c_p}{T} dT$$

$$\Delta S_T^0 = S_T^0 - (S_0^0 - S_{298}^0) \int_{298}^T \frac{c_p}{T} dT$$

Представляючи теплоємність вуглецевого матеріалу як явну функцію температури і підставляючи в попереднє рівняння, після інтегрування остаточно отримуємо:

$$\Delta S_T^0 = a(\ln T - \ln 298) + b(T - 298) - \frac{1}{2}c \left(\frac{1}{T^2} - \frac{1}{298^2} \right)$$

де a , b , c – змінні, що характеризують природу вуглецевого матеріалу [4] (коефіцієнти формули теплоємності вуглецевих матеріалів при різних температурах обробки)

Відтак застосування ентропії при веденні кампанії випалювання дозволяє визначити готовність продукції та завершення кампанії в цілому.

1.5. Аналіз питань математичного моделювання процесу випалювання

Розроблення та дослідження автоматичних систем керування технологічним об'єктом зазвичай обумовлює функціонування об'єкту в граничних умовах, а відтак, проведення експериментальних досліджень безпосередньо на реальному об'єкті пов'язано з значними затратами та аварійно небезпечними ситуаціями.

У випадку випалювання вуглецевих виробів, окрім зазначених класичних проблем проведення експериментальних досліджень, додається довготривалість експерименту. Відомо, що кампанія випалювання в середньому займає 360-520 годин, що значно ускладнює ведення експерименту.

У зв'язку з цим виникає необхідність використання іншого підходу для проведення досліджень, єдиною альтернативою у цій ситуації є метод математичного моделювання процесу випалювання вуглецевих виробів. У результаті це дозволить без втручання у технологічний процес дослідити особливості ведення процесу та створену систему керування та, за необхідності, внести корективи в її роботу.

Зважаючи на характер теплообміну, газодинамічні процеси при горінні природного газу, великі розміри та ін., багатокамерні печі є досить складним об'єктом для математичного моделювання. Це в основному і визначило, те що кількість робіт присвячено цій проблемі в літературних джерелах є дуже обмеженою.

Автором роботи [44] сформований математичний опис процесів, що протікають при випалюванні вуглеграфітових заготовок в камері багатокамерної печі, що дозволяє моделювати: температурне поле камери печі для різних варіантів конструкції печі випалювання, температурний графік випалювання, тяговий режим в газовому тракті печі та процес видалення летючих.

Математичну модель процесу випалювання, що включає розв'язок задач теплообміну між димовими газами і муфельними каналами печі, теплопровідності в тілі заготовки, процесу виділення летких продуктів термічної деструкції, зміни щільності заготовки при випалюванні реалізовано в середовищі MCAD 2000 Pro.

Даний математичний опис дозволяє розраховувати температуру циліндричної заготовки в режимі реального часу. Розподіл температури в заготовці може бути визначено розв'язанням задачі нестационарної теплопровідності через стінки муфеля, графітову засипку і всередині виробу.

Розроблена у роботі [45] модель заснована на розв'язанні систем рівнянь, що описують:

а) теплообмін між продуктами згоряння, поверхнею контейнера з заготовками в пересипці і поверхнями футерування робочої камери печі;

б) теплообмін в контейнері, включаючи області засипки і заготовок, а також в футеровці печі.

Для розв'язання задачі теплообміну в системі газ - кладка - поверхня контейнера застосували спрощений зональний метод радіаційного теплообміну в поглинаючому і випромінюючому середовищі. В рамках цього методу система зональних рівнянь формується шляхом підстановки виразів для потоків результуючого випромінювання і конвективної тепловіддачі в рівняння теплового

балансу кожної із зон, включаючи тепловий потік, що надходить, або залишає реальну зону за рахунок причин, не пов'язаних з теплообміном між зонами.

З аналізу літературних джерел можна зробити висновок, що наведені математичні моделі є неповними і недостатніми, щоб в повній мірі оцінити вплив тепло-гідродинамічних процесів, що протікають під час кампанії випалювання в багатоканальних печах.

В даний час моделювання процесу випалювання ведеться без урахування вище наведених особливостей, що позначається на якості моделювання. У зв'язку з цим актуальним є розроблення математичної моделі процесу випалювання вуглецевих виробів та дослідження керуючих впливів для отримання оптимальних умов випалювання.

У наведених вище роботах в основному розглядаються спрощені математичні моделі з поділом на більш прості задачі, наприклад без врахування турбулентного руху газів. Відтак, пропонується, на досвіді авторів [35] питання математичного моделювання процесу горіння розглянути на прикладі інших агрегатів, зокрема, теплових двигунів [46].

В печах випалювання на етапі «камера під вогнем» відбувається процес турбулентного горіння природного газу і тому може бути описаний схожими математичними моделями, які були розроблені для іншого промислового обладнання.

На етапі нагрівання димовими газами та охолодженням повітрям відбувається процес конвективного теплообміну, а у твердих конструкціях печі – здійснюється за рахунок теплопровідності.

Відповідно до цього, кільцеву багатоканальну печ випалювання як об'єкт математичного моделювання можна розглядати як піч, що складається з декількох десятків камер, розташованих у два ряди та з'єднаних між собою димоходом. Камери розділені між собою міжканальними простінками. Муфельні простінки всередині камери утворюють кілька касет. В середину кожної касети, попередньо заповненої нижнім шаром пересипки, завантажуються «зелені» заготовки, між

якими і зверху яких також засипається пересипка. Зверху камера накривається теплоізолюваним укриттям – склепінням.

Димові гази печі є стисливою рідиною, температура яких може сягати понад 1300 °С, мають властивості поглинаючого і випромінюючого, нерозсіючого середовища. Режим руху газів в каналах печі є турбулентним. Теплообмін у газовому тракті печі є складним радіаційно-конвективним [47-48], а у твердих конструкціях печі – здійснюється за рахунок теплопровідності. На етапі «камера під вогнем» у вогневих каналах і під склепінням печі відбувається процес горіння природного газу. Згоряння природного газу в об'ємі печі вважається повним з утворенням діоксиду вуглецю і водяної пари. Кінетика хімічної реакції дифузійного турбулентного горіння ґрунтується на законі Ареніуса [49] і вихрової дисипації. Нагрівання димових газів відбувається за рахунок хімічної реакції горіння і дисипації їх в'язкості.

1.5.1. Математична модель нестационарного дифузійного згоряння природного газу в турбулентному потоці

Математична модель нестационарного дифузійного згоряння природного газу в турбулентному потоці та може бути побудована на базі осереднених за Рейнольдсом рівнянням Нав'є-Стокса (Reynolds averaged Navier-Stokes equations, RANS) в наближенні $k - \epsilon$ моделі з врахуванням стисливості рідини. Дана модель представлена у роботі [50]

Відповідно до запропонованої моделі важливою її складовою є моделювання турбулентного режиму руху газів. В даний час найбільш поширеним способом моделювання турбулентності є використання осереднення Рейнольдса (RANS), коли замість рівнянь для миттєвих значень параметрів використовуються рівняння для деяких усереднених величин. Ця процедура вводить незакриті величин, які повинні бути змодельовані з використанням моделей турбулентності горіння.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) &= 0 \\
\frac{\partial \rho u_j}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_j} &= \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} \\
\frac{\partial(\rho Y_k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i Y_k) &= -\frac{\partial}{\partial x_i}(Y_{k,i} Y_k) + \dot{\omega}_k, k = \overline{1, N} \\
\frac{\partial \rho h_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h_s) &= \dot{\omega}_T + \frac{D_p}{D_t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \sum_{k=1}^N Y_{k,i} Y_k h_{s,k}) + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}
\end{aligned}$$

де ρ - щільність; t - час; u_i - компоненти швидкості; p - тиск; τ_{ij} - тензор напружень; Y_k - масова частка компоненти хімічної реакції горіння; $V_{k,i}$ - дифузійна швидкість k -го компонента; $\dot{\omega}_k$ - швидкість реакції k -го компонента; h_s - ентальпія; $\dot{\omega}_T$ - об'ємне джерело теплоти за рахунок горіння; D_p/D_t - субстанціональна похідна від тиску; D_t - коефіцієнт турбулентної дифузії; λ - теплопровідність; T - температура.

В результаті усереднення наведених вище рівнянь отримуємо:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho} \tilde{u}_i) &= 0 \\
\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) + \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\tau}_{ij} - \bar{\rho} \tilde{u}_i'' \tilde{u}_j'') \\
\frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{Y}_k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{Y}_k) &= -\frac{\partial}{\partial x_i}(\overline{Y_{k,i} Y_k} + \bar{\rho} \tilde{u}_i'' \tilde{Y}_k'') + \bar{\omega}_k, k = \overline{1, N} \\
\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{h}_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{h}_s) &= \bar{\omega}_T + \frac{\bar{D}_p}{\bar{D}_t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\lambda \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} - \overline{\rho u_i'' h_s''}) + \overline{\tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}} - \frac{\partial}{\partial x_i}(\overline{\rho \sum_{k=1}^N Y_{k,i} Y_k h_{s,k}})
\end{aligned}$$

Як вже було сказано для системи рівнянь Рейнольдса, що описують усереднений потік рідини при турбулентному режимі з'являються додаткові невідомі параметри, що мають фізичний зміст тензора турбулентних напружень.

Для замикання системи необхідно отримати формулу турбулентної в'язкості. В наш час для вирішення цієї задачі частіше всього використовуються двопараметричні моделі. Однією з таких моделей є $k - \epsilon$ модель [50].

З точки зору теорії розмірностей можна припустити що відношення k/ϵ і є той час за який енергія руху великих вихрів, отримана від усередненого руху,

проходить весь спектр масштабів розмірів: від найбільш великих до самих малих при яких відбувається дисипація турбулентної енергії.

При такому підході турбулентна в'язкість визначається як:

$$\mu_t = \bar{\rho} C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

де турбулентна кінетична енергія k і швидкість її дисипації ε описуються за допомогою двох рівнянь балансу:

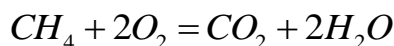
$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho}\tilde{u}_i k) &= \frac{\partial}{\partial x_i}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_i}] + P_k - \bar{\rho}\varepsilon \\ \frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho}\tilde{u}_i \varepsilon) &= \frac{\partial}{\partial x_i}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \bar{\rho} \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned}$$

Константи в k-е моделі турбулентності зазвичай приймають:

$$C_\mu = 0.09; \sigma_k = 1.0; \sigma_\varepsilon = 1.3; C_{\varepsilon 1} = 1.44; C_{\varepsilon 2} = 1.92;$$

Ця модель користується великою популярністю завдяки своїй простоті і економічній ефективності.

Аналіз горіння метану у печі ґрунтується на припущенні повного згорання природного газу до CO_2 і H_2O . Тоді рівняння хімічної реакції горіння буде мати вид:



Реакція визначається стехіометричними коефіцієнтами і миттєвими термодинамічними параметрами, від яких залежить її швидкість. Турбулентне змішування реагентів є фактором, що обмежує швидкість реакції. Турбулентно-хімічна взаємодія при горінні природного газу описується за допомогою двох моделей: перша – модель обмеженої швидкості реакції на основі закону Ареніуса [47]; друга – модель вихрової дисипації (Магнунсена) [50]. В результаті використовується менше з отриманих значень по швидкості реакції.

Наведена модель включає в себе рівняння нерозривності, збереження кількості руху, транспорту хімічних компонентів реакції горіння, енергії в

ентальпійному вигляді, турбулентної кінетичної енергії і швидкості її дисипації [51] та має вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{V}) = 0; \\ \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{V}}{\partial \tau} + (\bar{\rho} \tilde{V} \cdot \nabla) \tilde{V} = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}_{eff} + \bar{\rho} g; \\ \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Y}_k}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{V} \tilde{Y}_k) = \nabla \cdot \bar{J}_k + \bar{\omega}_k, k = \overline{1, N}; \\ \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{h}}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{V} \tilde{h}) = \bar{\omega}_T + \frac{Dp}{D\tau} + \nabla \cdot \left(\bar{\lambda} \nabla T + \frac{\mu_t}{Sc_t} \nabla h \right) + \bar{\bar{\tau}}_{eff} : \nabla \nabla - \nabla \cdot \left(\bar{\rho} \sum_{k=1}^N J_k h_k \right) + E(\tilde{T}); \\ \frac{\partial \bar{\rho} k}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{V} k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k + G_b - \bar{\rho} \varepsilon - Y_M; \\ \frac{\partial \bar{\rho} \varepsilon}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{V} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \bar{\rho} C_1 S \varepsilon - \bar{\rho} C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b, \end{array} \right.$$

де $\bar{\rho}$ – густина, усереднена за Рейнольдсом, кг/м³; τ – час, с; $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$ –

оператор Гамільтона; $\tilde{V}^T = (\tilde{V}_x, \tilde{V}_y, \tilde{V}_z)$ – вектор швидкості, усереднений за Фавром,

м/с; p – тиск, Па; $\bar{\bar{\tau}}_{eff} = (\mu + \mu_t) \left[\nabla \tilde{V} + (\nabla \tilde{V})^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \tilde{V}) I \right] - \frac{2}{3} \bar{\rho} k$ – тензор

ефективних напружень розтягування–стиснення, Па; μ – динамічна в'язкість,

Па·с; $\mu_t = \bar{\rho} C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ турбулентна в'язкість, Па·с; k турбулентна кінетична енергія,

Дж/кг; ε – швидкість дисипації турбулентної кінетичної енергії, Дж/(кг·с); I –

одиничний тензор другого рангу; $g^T = (g_x, g_y, g_z)$ – вектор прискорення вільного

падіння, м/с²; $Y_k = m_k / m, k = \overline{1, N}$ – масова частка компоненти хімічної реакції

горіння; m_k – маса k-тої компоненти, кг; m – маса горючої суміші, кг; N –

кількість компонентів реакції горіння; $\bar{J}_k = - \left(\bar{\rho} D_k + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla \tilde{Y}_k$ – вектор

дифузійного турбулентного потоку k-тої компоненти, кг/(м²·с); D_k – коефіцієнт

дифузії k-тої компоненти, м²/с; $Sc_t = \frac{\mu_t}{\rho D_t}$ – число Шмідта; D_t – коефіцієнт

турбулентної дифузії, $\text{м}^2/\text{с}$; $\bar{\omega}_k$ – джерело за рахунок середньої швидкості реакції k -тої компоненти, $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$; $\tilde{h}_k = \int_{T_{ref,k}}^{\tilde{T}} c_{p,k} dT$ – ентальпія k -тої компоненти, $\text{Дж}/\text{кг}$;

T – температура, К ; $T_{ref,k}$ – температура відліку, К ; $\bar{\omega}_T = -\sum_{k=1}^N h_k^0(T_{ref,k}) \bar{\omega}_k$ – об'ємне джерело теплоти за рахунок горіння, $\text{Вт}/\text{м}^3$; $\frac{\overline{Dp}}{D\tau} = \frac{\partial \bar{p}}{\partial \tau} + \tilde{V} \cdot \nabla \bar{p} + \frac{\mu_t}{\bar{\rho} S c_t} \nabla \bar{p}$ – субстанціональна похідна від тиску, $\text{Вт}/\text{м}^3$; λ – теплопровідність, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; $:$ – оператор скалярного добутку двох тензорів; $E(\tilde{T}) = K \left(\int_{\Omega=4\pi} I(s) d\Omega - 4n^2 \sigma T^4 \right)$ – об'ємна густина радіаційного теплового потоку «сірого» середовища, $\text{Вт}/\text{м}^3 \cdot \text{К}$ і n – коефіцієнт поглинання (м^{-1}) і показник заломлення, відповідно; Ω – тілесний кут, ср ; σ – постійна Стефана–Больцмана, $\text{Вт}/(\text{м}^2 (\text{К}^4))$;

$I(s) = I(s_0) \exp\left(-\int_{s_0}^s K ds\right) + n^2 \sigma \int_{s_0}^s K \exp\left(-\int_{s_0}^s K ds''\right) ds'$ – інтенсивність випромінювання ($\text{Вт} \cdot \text{с}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср})$) в напрямку s в тілесному куті $d\Omega$; s_0 – відповідає межі; $G_k = \mu_t S^2$ – джерело турбулентної кінетичної енергії за рахунок середнього градієнта швидкості, $\text{Вт}/\text{м}^3$; $S = \sqrt{2S:S}$ – модуль тензора середньої швидкості деформації, с^{-1} ; $S = \frac{1}{2} [\nabla V + (\nabla V)^T]$ – тензор середньої швидкості деформації другого рангу, с^{-1} ; $G_b = -g \frac{\mu_t}{\bar{\rho} \text{Pr}_t} \nabla p$ – джерело турбулентної кінетичної енергії за рахунок гравітації, $\text{Вт}/\text{м}^3$; $\text{Pr} = \frac{\mu_t c_p}{k}$ – турбулентний число Прандтля; $Y_M = 2\rho \epsilon M_t^2$ – член, що враховує ефект стисливості турбулентного потоку, $\text{Вт}/\text{м}^3$; $M_t = \sqrt{k/a^2}$ – турбулентне число Маха; $a = \sqrt{\gamma R T / W}$ – швидкість звуку, $\text{м}/\text{с}$; γ – показник адіабати; R – універсальна газова постійна, $\text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$; W – молярна маса газу,

кг моль; $C_1 = \max\left(0.43, \frac{\eta}{\eta + 5}\right)$; $C_\mu = \left[A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}\right]$; $U^* = \sqrt{S:S + \tilde{\Omega}:\tilde{\Omega}}$, c^{-1} ; $\tilde{\Omega}$ –

тензор середньої швидкості обертання другого рангу, c^{-1} ; $\eta = S \frac{k}{\varepsilon}$; $A_s = \sqrt{6} \cos \phi$;

$\phi = \left[3 \cos(\sqrt{6}\bar{W})\right]^{-1}$, рад; $\bar{W} = \frac{3J_3}{\tilde{S}^3}$; $J_3 = \det(S)$ – третій інваріант S ; $\tilde{S} = \sqrt{S:S}$, c^{-1} ;

$C_{3\varepsilon} = \tanh\left|\frac{V_{\parallel}}{V_{\perp}}\right|$; V_{\parallel}, V_{\perp} – складові швидкості потоку – паралельна і перпендикулярна

до вектора гравітації, м/с; ν – кінематична в'язкість, m^2/s ; $\sigma_k = 1.0$; $\sigma_\varepsilon = 1.2$;

$A_0 = 4.04$; $C_{1\varepsilon} = 1.44$; $C_2 = 1.9$ – константи $k - \varepsilon$ моделі.

Перший член в правій частині рівняння енергії пов'язаний з джерелом теплоти хімічної реакції горіння, другий – з роботою тиску, третій – з теплопровідністю, четвертий – з дисипацією в'язкості, п'ятий – з дифузією компонентів хімічної реакції і шостий – з тепловим випромінюванням.

Початкові умови:

$$\begin{cases} T(X) = T_0, \\ V(X) = 0, \\ Y_k(X) = Y_{0k}, \quad k = \overline{1, N}; \\ k(X) = k_0, \\ \varepsilon(X) = \varepsilon \end{cases}$$

де $X(x, y, z) \in \Omega$ – декартові координати, м; Ω – розрахункова область.

Граничні умови:

– на вході природного газу і окислювача (гази з попередньої камери) і на виході з камери печі

$$\begin{cases} G = G_{inlet-g}; \\ Y_{CH_4} = Y_{CH_4-inlet}; \\ T = T_{inlet-g}; \\ k = k_{inlet-g}; \\ \varepsilon = \varepsilon_{inlet-g}, \end{cases}$$

$$\begin{cases} G = G_{inlet-oxid}; \\ Y_{O_2} = Y_{O_2-inlet}; \\ T = T_{inlet-oxid}; \\ k = k_{inlet-oxid}; \\ \varepsilon = \varepsilon_{inlet-oxid}, \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_{outlet} = 0; \\ Y_{O_2} = Y_{O_2-outlet}; \\ T = T_{outlet}; \\ k = k_{outlet}; \\ \varepsilon = \varepsilon_{outlet}, \end{cases}$$

де G – масова витрата, кг/с;

– на межах контакту твердих елементів конструкції печі (абсолютний контакт), газовий тракт печі – канали печі і огороження печі з навколишнім середовищем.

$$\begin{cases} \{T\} = 0; \\ \{n \cdot q\} = 0, \end{cases}$$

$$\begin{cases} V = 0; \\ \{T\} = 0; \\ \{n \cdot q - q_r\} = 0, \end{cases}$$

$$n \cdot (-\lambda \nabla T) = \alpha_{eff}(T)(T - T_{env.sp}),$$

де $\{T\} = T^+ - T^-$; $\{n \cdot q\} = n^+ \cdot q^+ - n^- \cdot q^-$; $q = -\lambda \nabla T$ – вектор щільності теплового потоку, Вт/м²; n – вектор нормалі до поверхні контакту; q_r – вектор щільності радіаційного теплового потоку, Вт/м²; α_{eff} – ефективний коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); $T_{env.sp}$ – температура довкілля, К.

1.5.2 Модель конвективного теплообміну

Адекватне моделювання конвективного теплообміну за допомогою його сполученого формулювання, при якому в результаті взаємодії температурних полів тіла і омивання його середовищем відбувається одночасна зміна температур тіла і середовища і одночасно з цим переміщення обсягів середовища в просторі, вимагає спільного, тобто сполученого, рішення рівнянь поширення теплових потоків в твердому тілі, в омиваючого його середовищі, а також рівнянь руху середовища Нав'є-Стокса.

Сполучене формулювання математичної моделі конвективного теплообміну вимагає також, щоб на кордоні дотику тіла із середовищем дотримувалась рівність температур і теплових потоків з боку тіла і середовища в кожній точці кордону. Тільки при такому формулюванні моделювання конвективного теплообміну враховується тепла взаємодія між тілом і рідиною (газом), яка не може бути врахованою при інших постановках.

В силу значних математичних труднощів рішення пов'язаних задач теплообміну робіт, присвячених цій тематиці, вкрай мало.

Сформулюємо рівняння сполученої математичної моделі конвективного теплопереносу в повітряному середовищі, що омиває поверхню твердого тіла. Постановка задачі конвективного теплообміну характеризується тим, що на відміну від традиційних рівнянь конвективного теплообміну (Нав'є-Стокса, перенесення енергії, нерозривності) додаються рівняння теплопровідності в твердому тілі, а також граничні умови 4-го роду, що виражають рівність температур і теплових потоків в кожній точці дотику рідини і тіла.

У загальному вигляді сполучена тривимірна математична модель, що описує стаціонарний конвективний теплообмін поверхні твердого тіла і середовища що його омиває (рідиною або газом) щодо малих змін температурного поля T і поля тиску в рідині p , має вигляд:

- рівняння Нав'є-Стокса

$$(\nabla \nabla) \nabla = -\nabla \frac{p'}{\rho} - g\beta T' + \nu \Delta \nabla$$

- рівняння переносу енергії в рідині

$$\nabla \nabla T' = a \Delta T'$$

- рівняння непереривності

$$\operatorname{div} \nabla = 0$$

- рівняння теплопровідності в твердому тілі з просторовою розподіленістю джерел теплоти

$$\lambda_w \Delta T'_w + Q(x, y, z) = 0$$

Граничні умови 4 роду на кордоні тіла та рідини:

$$-(\lambda_w \frac{\partial T'_w}{\partial n})_{\partial S} = -(\lambda \frac{\partial T'}{\partial n})_{\partial S},$$

$$T'_w|_{\partial S} = T'|_{\partial S}$$

де, Q - об'ємна густина джерел тепла в тілі; $T = T_a + T'$, $p = p_0 + p'$, T_a та p_0 - деякі постійні середні значення температури та тиску в рідині, від яких розраховуються нерівномірності температури T' та тиску p' ; T' та ∇ - тривимірне поля температури та швидкості в середовищі, T'_w - тривимірне температурне поле в тілі. ν - кінематична в'язкість, $a = \lambda / \rho c$ - температуропровідність, λ - теплопровідність, ρ - густина, c - теплоємність, β - температурний коефіцієнт розширення середовища, λ_w - теплопровідність матеріалу тіла, g - прискорення вільного падіння, n - нормаль до поверхні тіла.

1.6. Аналіз існуючих систем керування процесом випалювання вуглецевих виробів

Починаючи з 50-тих років минулого століття, схема технологічного процесу випалювання майже не змінилась та являє собою нагрівання заготовок від початкової температури до кінцевої температури випалювання за заданим графіком зі швидкістю, яка визначається набором фізико-хімічних властивостей виробів, які необхідно отримати. Але, незважаючи на численні спроби

автоматизувати роботу багатокамерних кільцевих печей випалювання [52-55], до останнього часу так і не була реалізована ефективна АСУТП даного процесу [56-58]. Відтак, аналіз існуючих на сьогоднішній день систем керування є доволі важливим кроком, що передуює розробленню системи керування, яка б відповідала сучасним вимогам.

Відповідно, до матеріалів роботи [59] два дифузійні пальники, що встановлені в склепінні камери, при тиску газу 3000 Па дозволяли вести процес випалювання за заданим графіком з точністю $-50 \dots + 30$ ° С. Контроль процесу зводився до виміру температури під склепінням камери і запису свідчень на вторинному приладі (самописці). Очевидно, що, крім низької точності дотримання графіка випалювання заготовок, такий спосіб управління призводив до невиправдано високої перевитрати палива і значного браку через досить великий перепад температури по висоті камери.

В зв'язку з практичною неможливістю регулювання співвідношення повітря/газ через особливість конструкції печі, а саме підсосу повітря на контакт склепіння з камерою печі, у роботах [60-61] наведено теоретичне обґрунтування використання системи імпульсного спалювання палива для багатокамерних печей випалювання, що призводить до зменшення перевитрати палива. А в роботах [62-63] дається обґрунтування до створення системи оптимального управління процесом випалювання вуглеграфітових заготовок з використанням системи імпульсного спалювання палива.

Авторами [63] стверджується, що через недоліки використання розрідження, як основного параметру керування подачею повітря виникає проблема підсосу повітря, а саме: зі збільшенням розрідження збільшується кількість повітря що подається через газовий тракт та збільшується підсос повітря. Це, в свою чергу, негативно впливає на показники процесу, адже зі збільшенням підсосу холодного повітря збільшується його вплив на температурні поля, а також зі збільшенням кількості повітря в камері печі в цілому відбувається перевитрата газу на 30-40% від теоретичного значення на тонну випалених виробів.

Згідно з досліджень у роботі [63] впливає, що запропонована система дозволяє зменшити перевитрату палива в зв'язку з надлишковим просочуванням повітря через склепіння печі на 12-15%. За результатами проведених випробувань, виконання даної методики забезпечує економію газу не менше ніж на 7-12%.

Недоліком даної системи є схема подачі повітря на пальники, для забезпечення необхідної інжекції повітря для спалювання палива. Запропонований спосіб передбачає подачу повітря під надлишковим тиском, для реалізації його інжекції, що можлива лише при додаванні в конструкцію печі насосів або ж його подачі напяму на пальники з атмосфери.

Перший спосіб передбачає модифікацію печі, що досить затратно. При використанні другого способу температура додаткового повітря, що йде на спалювання значно менша, ніж при його проходженні через камеру, що знаходиться на охолодженні. Відповідно до цього температура факелу зменшується, а тому для забезпечення відповідного температурного режиму необхідне збільшення витрати палива.

У роботі [63] доведена ефективність застосування нейромережевого моделювання показників якості процесу випалювання для оперативного управління цими показниками. Перевагою даного підходу є можливість визначення невимірюваних показників якості процесу випалювання за вимірюваними і керуючими параметрам за допомогою штучних нейронних мереж.

Стратегія оптимального управління тепловим об'єктом формується з вимог максимальної відповідності температури випалювання заданому часовому графіку випалювання з одночасним забезпеченням відсутності перерегулювання. Дана задача вирішувалась шляхом синтезу і порівняльного аналізу систем за критерієм мінімуму собівартості на базі оптимального ПД-регулятора і нейромережевого прогнозуючого контролера. Початкові налаштування коефіцієнтів ПД-регулятора визначені методом Циглера - Ніколса для аперіодичного перехідного процесу (без перерегулювання). В подальшому, для

розрахунку оптимальних параметрів ПД-регулятора за критерієм мінімуму середньоквадратичного відхилення помилки системи від заданого значення проведена оптимізація системи засобами Simulink, використовуючи блок Output Constraint. Автором зроблені висновки, що результати роботи розроблених систем регулювання, мають перерегулювання що становить 33%, та зумовлюють пошук альтернативних рішень щодо синтезу САУ процесу.

У праці [63] була запропонована можливість поліпшення якості управління температурним режимом процесу випалювання шляхом синтезу системи управління із застосуванням нейромережевого прогнозуючого контролера (NN Predictive Control - NN PC). Як середовище для розробки, навчання, імітаційного моделювання нейромережевої системи управління використовувався програмний продукт фірми Math Works, Inc. - Matlab 7,01 з розширенням Neural Networks Toolbox. Блок NN Predictive Control, містить в своєму складі дві нейронні мережі: нейроконтролер - Optim і NN Model. NNPC використовує NN Model об'єкта, для передбачення його реакції на вхідний вплив. Блок Optim NNPC обчислює керувальні впливи, які мінімізують заданий критерій, прогнозує поведінку об'єкта на моделі на заданому кроці прогнозу (N_u) і потім видає на об'єкт керуючий сигнал оптимальної величини.

В результаті синтезу і імітаційного моделювання систем автоматичного регулювання об'єкта з самовирівнюванням, яким є камера печі випалювання, авторами роботи [63] встановлено, що необхідна якість регулювання температурним режимом забезпечується як оптимальним ПД-регулятором, так і нейромережевим прогнозуючим контролером. Однак найкращі показники якості параметрів регулювання досягнуті з прогнозуючим нейроконтролером. Незважаючи на достатню складність технічної реалізації NNPC-контролера, розробка і застосування його для печей електродів є розумною альтернативою перед традиційним регулятором. З результатів роботи [60] видно, що розроблена система керування забезпечує отримання продукції заданої якості та мінімізує витрати природного газу до 14%.

Автором роботи вказано, що в усьому діапазоні регулювання витрати газу автоматично підтримується оптимальне співвідношення газ - повітря для газоповітряної суміші. Оскільки температура газового середовища камери печі залежить не тільки від співвідношення газоповітряної суміші а і від температури її складових, то за умов подачі повітря з камери, що знаходиться на охолодженні, а відтак його попереднього підігрівання задача відсутності перерегулювання у стратегії оптимального управління повністю не вирішена.

У патенті [64] описано метод керування печами випалювання на базі показника випалювання. Ідея базується на тому факті, що температура анода, а отже і якість, відповідає сумарному тепловому потоку протягом усього часу випалювання. А отже, однакова якість аноду може бути досягнуто з використанням різних температурних режимів, доки загальний тепловий потік залишається незмінним.

Відповідно до вище сказаного можна визначити індекс випалювання, який являє собою часовий інтеграл температур оточуючих димоходів. Еталонний індекс випалювання може бути легко знайдений, беручи реальні температурні криві оточуючих димоходів, у випадку, коли забезпечується потрібна якість анодів. Використовуючи цей показник випалювання як довідковий індекс, потрібно лише шукати відхилення від його еталонного значення.

Внаслідок порушень режиму горіння індекс випалювання змінюється, а отже якісна оцінка анода змінюється. З відхиленням від еталонного індексу випалювання значення відхилення характеризує відсутність або надлишок теплового потоку до анода.

Одним із застосувань індексу випалювання є компенсація недостатності або перевищення теплового потоку за допомогою автоматичного коригування температурної кривої випалювання. Простий розрахунок показує, що період часу з пониженням або перевищенням температури можна виправити за час, що залишився, шляхом зміни температурного графіка.

Нагрівання печі є в основному конвекційним теплообміном, а тому градієнт температури контролюється обсягом димових газів. Відтак коли на пальниках

недостатньо повітря для горіння, паливо не спалюється повністю, а ефективність його горіння, або навіть температура в димоході, падає. Реакція звичайного керування процесом випалювання полягає у збільшенні об'єму палива, для збільшення поточного значення температури. Відповідно ефективність горіння палива може стати ще гіршою і, нарешті, особливо з використанням природного газу, незгорілий газ охолоджуватиме димохід. Отже, як другий аспект, на основі індексу випалювання, можливе управління якістю процесу горіння необхідного для забезпечення оптимальної роботи печі. Для цього необхідно обчислювати або оцінювати кисневу ситуацію в димоході.

Недоліком даного методу є його неуніверсальність при випалюванні продукції різних розмірів. Зрозуміло, що для кожного окремого розміру продукції, або варіації їх завантаження необхідно спочатку визначити відповідний еталонний індекс випалювання, тільки після чого можливе керування даним процесом за запропонованим алгоритмом.

Можливість компенсації раніше допущених відхилень від температурної кривої випалювання в подальшому призводить до необхідності розрахунку максимально допустимого значення, що може бути компенсоване за час, що залишився, без виникнення дефектів в заготовках. Відтак можлива ситуація, коли еталонний індекс випалювання не буде досягнутий за час, що залишився, через потребу у дотриманні температурних обмежень.

Робота [45] присвячена визначенню основних недоліків, що виникають при проведенні кампанії випалювання вуглецевих виробів, на основі результатів експериментів. Отримані результати обчислювальних експериментів показали, що тепло, закумульоване кладкою печі і пересипкою, значно ускладнює регулювання температурного режиму, що дозволяє стверджувати, що печі для випалювання вуглеграфітових заготовок мають наступні основні недоліки:

- обмежені можливості щодо забезпечення мінімальних перепадів температур по об'єму заготовок і регулювання швидкості їх нагрівання;
- неповне використання тепла палива і обмежені можливості по використанню тепла, що виділяється в процесі випалювання летючих речовин;

- значні витрати тепла на нагрівання кладки і пересипки.

Усунення перерахованих вище недоліків вимагає модернізації системи нагрівання печей, внесення змін до їх конструкції і вдосконалення системи контролю і регулювання температурного режиму процесу випалювання. В якості можливих варіантів вирішення цих завдань авторами роботи [45] було запропоновано наступне:

Застосування систем імпульсного нагрівання, аналогом яких є імпульсне нагрівання сталевих злитків перед обтискними станами. В умовах імпульсного нагрівання заготовок в пересипці її значний тепловий опір відіграє позитивну роль, тому що сприяє зменшенню прямого теплового впливу на заготовки. Імпульсне нагрівання дозволить поліпшити можливості регулювання температурного режиму протягом усього процесу випалювання. Однак при такій системі опалення залишається невирішеною проблема допалу летючих речовин. Також залишаються всі недоліки наведені у роботі [59].

- устаткування печей окремими виносними топками. Спалювання палива в високотемпературних виносних топках дозволить вирішити проблему допалу в них летючих речовин, що виділяються.

- для забезпечення можливості досить швидкої зміни швидкості нагрівання заготовок необхідно зменшити кількість тепла, акумульованого кладкою за рахунок застосування волокнистих вогнетривких матеріалів.

У роботі [65] представлена модель нагрівальної печі в процесах виробництва сталеві смуги при проектуванні систем самонастроювання. Параметри моделі оцінюються за допомогою алгоритму, який називається рекурсивною оцінкою параметрів з коефіцієнтом забування векторного типу (REVVF). Розроблено алгоритм REVVF для таких випадків, коли деякі знання про мінливість параметрів можна отримати заздалегідь.

Представлена система управління температурою смуги є ієрархічною. Верхній рівень називається "оптимальним контролем попереднього перегляду", який виконує попередній контроль. Він переглядає наближення зміни налаштування, якими є зміна розміру смуги або еталонної температури, і

оптимізує швидкість лінії і траєкторію температури смуги. Наступний, нижній рівень називається «контроль відстеження температури», який реалізує замкнене управління, використовуючи вищевказану траєкторію в якості контрольної мети.

Що стосується переваг роботи запропонованого підходу в порівнянні з традиційним ПІД-контролем, то найбільшою перевагою є збільшення продуктивності виробництва від 3 до 5%, оскільки контроль є достатньо точним, щоб позбавити операторів від частого втручання та уповільнення швидкості лінії через небезпеку недогрівання смуги.

Застосування даного підходу при випалюванні вуглецевих заготовок в багатокамерних печах у випадку, коли в камерах, що знаходяться «під вогнем», і камерах на підігріванні димовими газами розміщені різні за розміром заготовки може призвести до визначення, елементом верхнього рівня даної ієрархії, траєкторії температури для камери що знаходяться «під вогнем», недопустимої для відтворення траєкторії температури камери, що знаходяться на підігріванні димовими газами. Оскільки температура димових газів прямо залежить від температури факелу, то в даному випадку можлива ситуація, при якій витрата палива на камері «під вогнем» достатня для забезпечення теплового режиму, а для камер з іншими заготовками, що знаходяться на етапі підігріванні димовими газами, температурний режим перевищує допустимі значення. Відтак відбувається ситуація, в якій одним із типів заготовок не буде відповідати поставленим умовам якості.

Дифузійна піч є важливим і незамінним обладнанням у процесі виробництва сонячних батарей, вона відіграє вирішальну роль у ефективності фотоелектричного перетворення сонячного елемента. Ефективність виробництва і точність регулювання температури традиційної закритої дифузійної печі низька. Для вирішення задачі підвищення ефективності печі в даній роботі [66] представлена система контролю температури в безперервній дифузійній печі. Система використовує ПІД-каскадний алгоритм управління на основі оцінки попередньої компенсації для досягнення контролю температури печі.

Традиційна система управління на базі ПД-регулятора може задовольнити вимоги системи в більшості випадків; але не в процесі управління об'єктом з нелінійними, тимчасовими змінами. Для вирішення даної проблеми в роботі [66] представлена система керування температурою на основі ПД-каскаду, що заснована на оцінці за Смітом компенсації перед самою компенсацією.

В даний час основними проблемами системи регулювання температури дифузійної печі є час процесу теплообміну, занадто довгий від стінки печі до середини печі, для чого розробляється алгоритм ПД -каскадного керування на основі Сміт-оцінки попередньої компенсації. Ідея каскадного керування полягає в тому, що додавання нового об'єкта управління - температури стінки печі, заснованого на вихідному об'єкті управління - температурі печі в камері, могло б завчасно відповідати на недоліки при зміні керувальної величини; а відтак попередній аналіз зміни температури стінок печі може поліпшити якість всієї системи управління.

Використання каскадного керування на основі Сміт-оцінки попередньої компенсації при розробці системи керування багатоканальною піччю випалювання має ряд переваг, проте через інерційність об'єкта навіть очікування зміни температури печі на деяких ключових етапах займає досить значний час. Відтак некоректний керуючий вплив призведе до нераціонального використання тих чи інших ресурсів. Однак, використання прогнозування температури стінки печі для даного алгоритму вирішує описану вище проблему інерційності.

З проведеного аналізу [67] існуючих систем керування процесом випалювання вуглецевих виробів стає зрозуміло, що основними проблемами при розробленні системи керування є: підсос повітря, температура повітря, що йде на подальше горіння, інерційність процесу, та перерегулювання.

Очевидно, що при моделюванні об'єкту як послідовності зв'язаних між собою основних етапів кампанії випалювання дозволяє вирішити проблему зв'язану з температурою повітря, що йде на подальше горіння. А підходи на базі прогнозування можуть вирішити проблеми, що виникають в результаті інерційності процесу, та передбачити ймовірне перерегулювання.

Відсутність можливості оцінювання якості або ступеня готовності продукції під час ведення процесу випалювання обумовлює перехід від класичних систем керування до систем керування на базі прогнозування.

1.7. Постановка завдань дослідження

У зв'язку із складністю технологічного процесу випалювання вуглецевих виробів для розроблення раціональних технологічних режимів ведення процесу та визначення закономірностей зміни температури у залежності від параметрів технологічного регламенту процесу необхідно провести дослідження кампанії випалювання.

Дослідження процесу випалювання «зелених» заготовок у багатокамерних печах полягають у визначенні:

- рівня температур різних типів заготовок протягом всього процесу випалювання;
- оптимального відповідно до даної конструкції печі завантаження заготовок;
- рівня температур заготовок при нагріванні димовими газами, при згоранні природного газу, при охолодженні повітрям, що поступає на спалювання;
- швидкості зростання мінімальної та максимальної температур у заготовках;
- перепаду температур у заготовках і по камері печі в цілому;
- зіставлення рівня температур під склепінням печі з температурами, які досягаються у пересипці і заготовках;
- впливу розрідження на перепад температур по заготовкам;
- впливу процесу горіння на температурні поля камери печі;
- залежності процесів горіння палива та охолодження заготовок від коефіцієнта надлишку повітря і, як результат, його впливу на температурні поля камери.

Висновки до розділу 1

1. В результаті аналізу технології процесу виробництва вуглецевих виробів обґрунтовано визначальну роль процесу випалювання вуглецевих виробів як найбільш значущого відповідно до енергозатрат та формування якості готової продукції.

2. Проведений розбір існуючих на даний момент показників якості готової продукції, в результаті якого показано неможливість їх застосування безпосередньо для керування процесом випалювання та обґрунтовано використання ентропії як показника якості ведення даного процесу.

3. Проведено розгляд конструктивних особливостей технологічних апаратів, де відбувається процес випалювання. У зв'язку з неможливістю використання реального об'єкту показано, що єдиним методом дослідження процесу випалювання вуглецевих виробів є математичне моделювання.

4. Аналіз існуючих на сьогоднішній день математичних моделей процесу випалювання вуглецевих виробів обґрунтував вибір описаної математична модель, на основі якої ґрунтується подальше дослідження теплових режимів кампанії випалювання.

5. З проведеного аналізу існуючих систем керування процесом випалювання зроблено висновки, що основними неврахованими складовими при розробленні системи керування є: підсос повітря, температура повітря, що йде на подальше горіння, інерційність процесу, та перерегулювання. В результаті обґрунтовано, що підходи на базі прогнозування можуть вирішити проблеми, що виникають в результаті інерційності процесу, та передбачити ймовірне перегулювання а моделювання об'єкту як послідовності зв'язаних між собою основних етапів кампанії випалювання дозволяє вирішити проблему зв'язану з температурою повітря, що йде на подальше горіння.

6. Сформульовані завдання дисертаційного дослідження, що спрямованні на підвищення ефективності ресурсо- та енергозбереження процесу випалювання вуглецевих виробів.

Список використаних джерел до розділу 1

1. Красюков А. Ф. Нефтяной кокс (Производство, свойства) : [изд. 2-е, доп. И перераб.] / А. Ф. Красюков — М. : Химия, 1966. — 277 с.
2. Привалов В. Е. Каменноугольный пек / В. Е. Привалов, М. А. Степаненко. — М. : Metallurgiya, 1981. — 208 с.
3. Чалых Е. Ф. Технология и оборудование электродных и электроугольных предприятий / Е. Ф. Чалых. — М. : Metallurgiya, 1972. — 432 с.
4. Шулепов С. В. Физика углеграфитовых материалов / С. В. Шулепов. — М. : Metallurgiya, 1972. — 256 с.
5. Данцис Я.Б. Электротермические процессы химической технологии / Я.Б. Данцис, В.А. Ершов, Г.М. Жиллов [и др.] — Л. : Химия, 1984. — 464 с.
6. Сюняев З. И. Производство, облагораживание и применение нефтяного кокса З. И. Сюняев. — М. : Химия, 1973. — 296 с.
7. Лутков А. И. Тепловые и электрические свойства углеродных материалов / А. И. Лутков. — М. : Metallurgiya, 1990. — 175 с.
8. А.с. 1755025 СССР. Способ укрытия теплоизоляционной шихты печи графитации / П. П. Сапко, В. П. Овсянников (СССР). — Открытия. Изобретения; опубл. 1992, Бюл. № 30.
9. Угольные и графитовые электроды для электропечей и электролизеров / (Систематическое собрание патентов, сост. М. Б. Шварцберг). — Л.-М., 1938.
10. Капелянов В. Я. Об оптимизации температуры смешивания компонентов электродных и анодных масс / В. Я. Капелянов // Цветные металлы. — 1990. — №7. — С. 75.
11. Полисар Э. П. Формирование упругих свойств графита в процессе прессования / Э. П. Полисар, В. П. Савченко, В. Я. Котосорова // Цветные металлы. — 1983. — № 6. — С. 59—61.
12. Карзунова Р.В. Влияние способа прессования на свойства графита / Р.В. Карзунова // Совершенствование технологии и улучшение качества электродной продукции : Сб. научн. Тр. — Челябинск : ГосНИИЭП, 1973. — Вып. 5. — С. 71—91.

13. Островский В.С. Искусственный графит / В.С. Островский, Ю.С. Виргильев, В.И. Костиков. – М. : Metallurgiya, 1986. – 272 с
14. Санников А. К. Производство электродной продукции [Текст]/ А. К. Санников, А. Б. Сомов, В. В. Ключников и др. – М.: Metallurgiya, 1985. – 129 с. – Библиогр.: 21 назв. – 1230 экз. УДК 621.3.035.2
15. Левашова А.И. Кравцов А.В. Химическая технология углеродных материалов. Учебное пособие. — Томск : Изд-во ТПУ, 2008. — 112 с.
16. Чалых Е. Ф. Оборудование электродных заводов : учеб. Пособие [для вузов] / Е. Ф. Чалых. — М. : Metallurgiya, 1990. — 238 с
17. Янко Э. А. Аноды алюминиевых электролизеров / Э. А. Янко — М. : Изд. Дом «Руда и металлы», 2001. — 670 с.
18. Чалых Е. Ф. Обжиг электродов / Е. Ф. Чалых. — М. : Metallurgiya, 1981. — 116 с.
19. Чалых Е. Ф. Технология углеграфитовых материалов / Е. Ф. Чалых. — М. : Metallurgizdat, 1963. — 304 с.
20. Колодин Э. А. Обжиг анодов для алюминиевых электролизеров. / Э. А. Колодин, В. А. Свердлин Р. В. Свобода. Производство обожженных анодов алюминиевых электролизеров. — М. : ЦНИИцветмет, 1980. — 42 с
21. Колодин Э. А. Производство обожженных анодов алюминиевых электродов / Э. А. Колодин, В. А. Свердлин Р. В. Свобода. — М. : Metallurgiya. — 1980. — 80 с.
22. Технический отчет по выполнению теплотехнических испытаний кольцевой 30-ти камерной печи №2 цеха обжига №2 ОАО «НЭЗ». ОАО «ЭРШРГО-ЧЕРМЕТ». Ростов-на-Дону. 2000.
23. Keller F. Process controlled operation of backing furnaces / F. Keller, S. Oberdolz // Aluchemic and Alusuisse R&D Carbon (Netherlands, Switzerland)
24. Hyvernats P. Aluminium Pechiney, AIME / P. Hyvernats, P. Fayet, J.L. Lemorchand // Light Metals. — 1983. — P. 821—841.
25. Axel J. Rolf. Hoogovens Al Hottenwerk GmbH, AIME / J. Rolf. Axel // Light Metals. — 1992. — P. 739—745.

26. Gerald F. Covanec. Century Aluminium of West Virginia, AIME / F. Covanec. Gerald // Light Metals. — 2000. — P. 573—578.
27. Sulzberger P. W., Bacon J.K. Comalko Aluminium Limited, AIME // Light Metals. 1989. P. 547-551.
28. Morbert A. Ambenne, Hero M. Bhavnani. Volta Auminium Ltd, AIME // Liglit Metals. 1989. P. 553-562.
29. Mannweiler U. R&D Carbon, AIME / U. Mannweiler, P. Sulzberger, S. Oberdolz // Light Metals. — 1991. — P. 635—639
30. Leisenberg W. Innovatherm prof. Or. Leisenberg GmbH + Co. KG, AIME / W. Leisenberg // Light Metals. — 1999. — P. 579—584.
31. Mainwald D., Schneider M. LVE Verfarenselektronik GmbH, AIME // Light Metals. 2000. P. 487-491.
32. Schneider M. Results of the installation of the new Prebake Firing and Control System. Hoogovens Voerde. Intern, business report. 1999.
33. Oberdolz S. R&D Carbon, AIME / S. Oberdolz, O. Muhlemann // Light Metals. — 1978. — P. 315—323
34. Особенности обжига углеродных изделий в электрических печах / А. И. Лутков, Э. В. Калинин // Композиционные материалы на основе углерода. сб. научн. тр. — М. : НИИГрафит, 1991. — С. 14—16
35. Теплообмен в многокамерных печах обжига углеграфитовых изделий : монография / И.В. Пулинец [и др.] ; Мин-во образования и науки Украины, НТУУ “КПИ”. — Киев : НТУУ “КПИ”, 2014. — 175 с.
36. Riedhammer GmbH & Co. KG. Comparison between Open and Closed Carbon Baking Furnace/ 90332 Nuremberg. 1993.
37. Глосарій термінів з хімії // Й. Опейда, О. Швайка. Ін-т фізико-органічної хімії та вуглехімії ім. Л. М. Литвиненка НАН України, Донецький національний університет. — Донецьк: Вебер, 2008. — 758 с. — ISBN 978-966-335-206-0.]
38. Терминологический словарь по бетону и железобетону. ФГУП «НИЦ «Строительство» НИИЖБ и м. А. А. Гвоздева, Москва, 2007 г. 110 стр.

39 Мала гірнича енциклопедія : у 3 т. / за ред. В. С. Білецького. — Д. : Східний видавничий дім, 2004—2013.

40. Левченко П. В. Расчет печей и сушил силикатной промышленности Москва, Высшая школа, 1968. - 363 с.

41. Исследование обжига углеграфитовых заготовок / Молокова Т. Л., Харлампович Г. Д., Сухоруков И. Ф. // Химия твердого топлива. — 1977. — №6. — С. 114—120.

42. Газовыделение образцов электродной массы при термообработке / Панов Е.Н., Д.Т.Н., Проф.; Шилович Т.Б., К.Т.Н.; Лелека С.В., Н.С.; Шилович Я.И., студ. Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

43. Жученко О.А. Аналіз показників якості випалювання вуглеграфітових електродних виробів / О. А. Жученко, А. П. Коротинський // Матеріали III Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами», 23 листопада 2016 р. [Електронний ресурс] – К: НУХТ, 2016 р. – 286 с. с. 47

44. Малахов С. А. Совершенствование технологии обжига углеграфитовой продукции в многокамерных печах обжига закрытого типа: автореф. Дис. На соиск. Учен. Степени канд. Техн. Наук : спец. 05.16.02 «Металлургия черных, цветных и редких металлов» / С. А. Малахов. — Владикавказ, 2004. — 30 с.

45. Шибалов С. Н. Совершенствование тепловых процессов с целью повышения качества обжига заготовок из углеграфитовых материалов: автореф. Дис. На соиск. Учен. Степени канд. Техн. Наук : спец. 05.16.02 «Металлургия черных, цветных и редких металлов» / С. Н. Шибалов. — М., 2004. — 30 с

46. Poinso T. Theoretical and numerical combustion / T. Poinso, D. Veynante. — 2nd ed. — Philadelphia : Edwards, 2005. — 522 p.

47. Зигель Р. Теплообмен излучением / Р. Зигель, Дж. Хауэлл ; пер. с англ. ; под ред.Б. А. Хрусталева. — М. : Мир, 1975. — 934 с.

48. Математичне моделювання складного теплообміну повітряних регенераторів /Є. М. Панов, А. Я. Карвацький, І. Л. Шилович, С. В. Лелека, І. В. Пулінець [Текст] :монографія. — К. : НТУУ «КПІ», 2011. — 103 с.

49. Magnussen B. F. On mathematical models of turbulent combustion with specialempphasis on soot formation and combustion / B. F. Magnussen, B. H. Hjertager // In 16th Symp.(Int'l.) on Combustion. The Combustion Institute. — Pittsburgh, 1976 — P. 719—727.

50. Карвацький А. Я. Математична модель тепло-гідродинамічного стану багатокамерної печі при випалюванні електродних заготовок / А. Я. Карвацький, І. В. Пулінець, І. Л. Шилович // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2012. — № 1/4 (55). — С. 33—37.

51. A New $k - \epsilon$ Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation / T.-H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang, J. Zhu //Computers Fluids. — 1995. — Vol. 24, N 3. — P. 227—238.

52. Киселев А.И., Сошкин СВ., Сычева О.В. и др. Локальные средства управления процессом обжига в многокамерных печах ТадАЗа для АСТП «Обжиг»././ «Состояние и перспективы автоматизации производственных процес сов 362 цветной металлургии» (Тезисы докладов к научно-техническому совещанию)-Орджоникидзе.- 1989.-С.100-101.

53. Сошкин СВ., Априамов В.Н., Жуковецкий О.В. и др. Импульсная система управления температурным режимом обжиговых печей. //Цветная металлургия.- 1988.-№11.-0.36-37.

54. Царахов С.С, Сошкин СВ., Жуковецкий О.В. Разработка приборов для контроля высоких температур в металлургии././ «Электронные приборы и системы в промышленности». (Тезисы докладов к научно-техническому совещанию)-Орджоникидзе.- 1989.-С.21-22,

55. Пеккер И.И., Савин М.М., Васильева В.Д. и др. Возможности автоматизации обжиговой печи././Совершенствование технологии и улучшение качества электродной продукции: Сб. науч. Тр. /ГосНИИЭП.- Челябинск.- 1976.- С.77-87

56. Жученко О. А. Постановка задачі керування процесом випалювання у виробництві вуглецевих виробів / О. А. Жученко, А. П. Коротинський // Гірничий вісник. Науково-технічний збірник. ДВНЗ «Криворізький національний університет». – 2017. - №102. – С. 174-179.

57. Коротинський А. П. Аналіз процесу випалювання вуглеграфітових виробів / Коротинський А.П., Жученко О.А. // Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта) [текст]: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта)» 14-18 листопада 2016 р. К: НУБіП, 2016 р. – 174 с. С 64-65.

58. Жученко О. А. Задачі керування процесом випалювання / Жученко О. А., Коротинський А. П. // Автоматика – 2017 [текст]: Матеріали XIV Міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика – 2017»:, м. Київ, Україна, 13–15 вересня 2017 року:.. Київ. 2017. 267 с. С 68-69.

59. Сошкин С. Система управления процессом обжига электродных материалов» / С. Сошкин, А. Антонян, Г. Полтораки, Н. Сорокин // Системная Интеграция. Металлургия. – 2006. -№3. С. 26-30

60. Сошкин СВ. К возможности создания импульсной системы сжигания топлива для камерных печей. Цветная металлургия, 1998, №3, с.55-58.

61. Сошкин с в . Проектирование оптимальной системы управления обжигом электродных изделий в камерных печах. Цветная металлургия, 1998, с.68-72,

62. Сошкин СВ., Априамов В.Н., Жуковецкий О.В. Цветные металлы, 1987, №9. 59. Сошкин СВ. Системы оптимального управления обжигом электродных заготовок. Цветные металлы, 1998, №3, с.66-70.

63. Сошкин, Григорий Станиславович. Исследование процесса обжига электродной продукции в многокамерных печах и разработка системы оптимального управления : диссертация ... кандидата технических наук :

05.13.06 / Сошкин Григорий Станиславович; [Место защиты: Сев.-Кавказ. Гор.-металлург. Ин-т].- Владикавказ, 2012.- 178 с.: ил. РГБ ОД, 61 12-5/3751

64. Wolfgang Leisenberg «Method for controlling a carbon baking furnace». Patent of USA #US 6,436,335 B1. Aug. 20, 2002

65. «Model-Based Control of Strip Temperature for the Heating Furnace in Continuous Annealing» IEEE Transactions On Control Systems Technology, Vol. 6, No. 2, March 1998

66. Ke, X., Luo, Z., Zhu, Y. and Liu, Y. The Temperature Control System of Continuous Diffusion Furnace. DOI: 10.5220/0005996402270233 In Proceedings of the 13th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2016) - Volume 1, pages 227-233 ISBN: 978-989-758-198-4

67. Жученко О. А. Сучасний стан питання розробки систем керування процесом випалювання вуглецевих виробів / О.А. Жученко, А.П. Коротинський// Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології [текст]: Матеріали Шостої Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ-2019), Київ, 23-24 квітня 2019р. – КПІ ім. Ігоря Сікорського, «Політехніка». С. 107-108.

РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ ПРОЦЕСУ ВИПАЛЮВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ

2.1. Опис умов дослідження

У дослідженнях розглядається одна із камер багатокамерної печі випалювання закритого типу, в яку завантажено 5 заготовок діаметрами 700 мм та висотою 2100 мм. Досліджувана касета печі випалювання з розміром $3,8 \times 0,76 \times 4,05$ м має геометрію, що наведена на рис 2.1. Нумерація заготовок зліва на право (починається від вогневого колодязя).

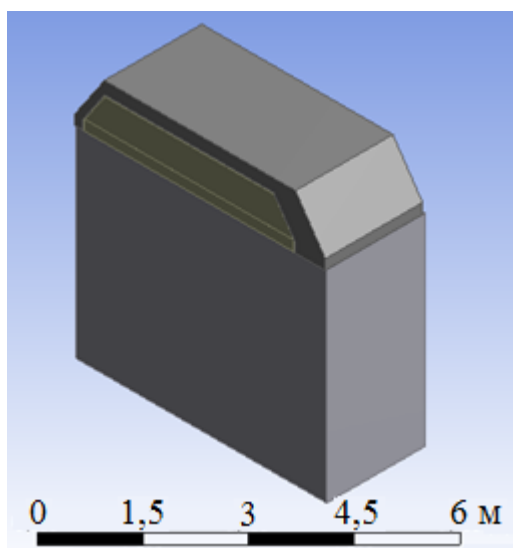


Рисунок 2.1. Геометрія касети печі випалювання

Для подальшого чисельного моделювання прийнято наведені в табл. 2.1 - 2.5 фізичні властивості матеріалів печі випалювання та її завантаження відповідно до [1-3]:

Таблиця. 2.1 Теплофізичні властивості вогнетривкого шамоту

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{Дж/(кг} \cdot \text{K)}$	$\lambda, \text{Вт/(м} \cdot \text{K)}$
273	1900	675	0,84
323	1900	797	-
373	1900	877	-
423	1900	933	-
473	1900	975	-

523	1900	1008	0,99
773	1900	1111	1,14
1023	1900	1176	1,29
1273	1900	1230	1,44
1523	1900	1279	1,59

Таблиця. 2.2 Теплофізичні властивості матеріалу заготовок

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{Дж/(кг} \cdot \text{K)}$	$\lambda, \text{Вт/(м} \cdot \text{K)}$
273	1635	690	8
400	1635	893	-
500	1635	1160	8,3
600	1635	1315	-
700	1635	1423	-
800	1635	1501	8,5
900	1635	1566	-
1000	1635	1620	8,8
1100	1635	1669	-
1200	1635	1710	9,3
1400	1635	1790	-

Таблиця. 2.3 Теплофізичні властивості теплоізоляційної шихти

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{Дж/(кг} \cdot \text{K)}$	$\lambda, \text{Вт/(м} \cdot \text{K)}$
273	800	690	0,35
400	800	893	-
500	800	1160	-
600	800	1315	-
700	800	1423	-
800	800	1501	0,73
900	800	1566	-

1000	800	1620	-
1100	800	1669	-
1200	800	1710	1,25
1400	800	1790	-

Таблиця. 2.4 Теплофізичні властивості димових газів

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{Дж/(кг} \cdot \text{K)}$	$\lambda \cdot 10^{-2}, \text{Вт/(м} \cdot \text{K)}$	$\mu \cdot 10^{-6} \text{Па} \cdot \text{с}$
273	1,295	1042	2,28	15,8
373	0,95	1068	3,13	20,4
473	0,75	1097	4,01	24,5
573	0,65	1122	4,84	28,2
673	0,6	1151	5,7	31,7
773	0,56	1185	6,56	34,8
873	0,53	1214	7,42	37,9
973	0,515	1239	8,27	40,7
1073	0,51	1264	9,15	43,4
1173	0,505	1290	10	45,9
1273	0,495	1306	10,9	48,4
1373	0,485	1323	11,75	50,7
1473	0,48	1340	12,62	53

Таблиця. 2.5 Теплофізичні властивості повітря

T, K	$c_p, \text{Дж/(кг} \cdot \text{K)}$	$\lambda, \text{Вт/(м} \cdot \text{K)}$
273	1005	0,0244
373	1009	0,0321
473	1026	0,0393
573	1047	0,046
673	1068	0,0521
773	1093	0,0574

873	1114	0,0622
973	1135	0,0671
1073	1156	0,0718
1173	1172	0,0763
1273	1185	0,0807
1373	1197	0,085
1473	1210	0,0915

Прийнято, що тривалість процесу випалювання 480 год., число камер на охолодженні – 1, число камер під вогнем – 1, число камер на підігріві димовими газами – 4. Темп випалювання складає 96 год.

2.2. Процес охолодження камери печі

Враховуючи, що охолодження камери печі відбувається повітрям, яке у подальшому йде на горіння палива, для проведення ефективного дослідження необхідно провести розрахунок кількості повітря, потрібного для горіння палива.

2.2.1. Розрахунок потрібної для горіння витрати повітря

Потрібна витрата повітря для горіння визначається з теоретичної кількості кисню, який входить в реакції окислення з урахуванням деякого надлишку, що забезпечує повне згоряння палива. При розрахунку потрібної витрати повітря враховується, що кисень, наявний в паливі, бере участь у реакціях горіння.

Розрахунки проводяться незалежно від витрати палива, що спалюється, тому такі величини, як коефіцієнт надлишку повітря потрібного для горіння, визначаються на одиницю об'єму газоподібного палива.

У розрахунках приймають такий склад повітря: азот - 79,0% і кисень - 21,0% за обсягом. Кількість вологи, що вноситься атмосферним повітрям, незначно збільшує витрату повітря і враховується (в основному при розрахунках

сушильних апаратів) його вологовміст, виражений у вагових одиницях. При розрахунках печей вологість атмосферного повітря зазвичай не враховується [4].

Теоретично потрібна для горіння витрата повітря дорівнює [4]:

$$L_0 = 4.76V_{o_2}$$

де V_{o_2} - теоретично потрібний об'єм кисню.

Теоретично потрібна витрата сухого повітря для горіння природного газу визначається таким чином [4]:

$$L_0 = 0.0476(2CH_4 + 3.5C_2H_6 + 5C_3H_8 + 6.5C_4H_{10} + 8C_5H_{12})$$

де $CH_4, C_2H_6 \dots$ - відсоткові відношення

Дійсна витрата сухого повітря з урахуванням коефіцієнта витрати повітря дорівнює:

$$L_a = aL_0$$

де a - коефіцієнт витрати повітря, що показує відношення дійсної кількості повітря, введеного для горіння, до теоретично потрібного. Для газу та мазуту коефіцієнт витрати повітря $a = 1,05-1,20$ [4].

Якщо відома витрата палива B , то загальна витрата сухого повітря, потрібного для спалювання палива, складе:

$$V_{нов} = BL_a$$

при вологовмісті d відповідно:

$$V_{нов}^{60l} = BL_a(1 + 0,0016d)$$

Розрахунок коефіцієнта витрати повітря, що подається на спалювання:

Таблиця. 2.6 Склад сухого природного газу

CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12}	CO_2	N_2	Сума
94.0	1.2	0.7	0.4	0.2	0.2	3.3	100

Для досліджень приймається, що газ спалюється з коефіцієнтом витрати повітря $a = 1.1$ та 1.2 .

Приймаємо вміст води у газі $1,0\%$. Перераховуємо склад сухого газу на вологий робочий газ:

$$CH_4^{60l} = CH_4^c \frac{100 - H_2O}{100} = 94.0 \cdot 0.99 = 0.93$$

Таблиця. 2.7 Склад вологого природного газу

CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	CO ₂	N ₂	H ₂ O	Сума
93.0	1.2	0.7	0.4	0.2	0.2	3	1	100

Знаходимо теоретично необхідну витрату сухого повітря:

$$L_0 = 0.0476(2 \cdot 93 + 3.5 \cdot 1.2 + 5 \cdot 0.7 + 6.5 \cdot 0.4 + 8 \cdot 0.2) = 9.42$$

Приймаємо вологовміст атмосферного повітря $d = 10$ г/кг та знаходимо теоретично потрібну витрату атмосферного повітря з урахування його вологості:

$$L'_0 = 1.016 \cdot 9.42 = 9.57$$

Справжня витрата повітря при коефіцієнті витрати $a = 1,2$ та витраті палива 30 м³/год:

- сухого повітря - 339 м³/год;
- атмосферного повітря - 344,4 м³/год.

Справжня витрата повітря при коефіцієнті витрати $a = 1,1$ та витраті палива 30 м³/год:

- сухого повітря - 310,8 м³/год;
- атмосферного повітря - 315,6 м³/год.

2.2.2. Дослідження охолодження камери печі повітрям, що йде на спалювання

Прийнято, що початкова температура всіх складових касети печі складає 1273 К. Температура повітря 300 К. Відповідно до витрати палива 30 м³/год, витрата повітря при надлишку $a = 1,2$ складає 339 м³/год, при надлишку $a = 1,1$ складає 310,8 м³/год.

У результаті дослідження отримано, що максимальна температура по всьому об'ємові камери печі при $a = 1,1$ складає 1193 К, при $a = 1,2$ досягає 1188 К, мінімальна температура при $a = 1,1$ складає 739 К, при $a = 1,2$ становить 683 К, що наведено на рис 3.2. Відповідно перепад температур по всьому об'ємові касети складає 454 К та 505 К. Очевидним є той факт, що при збільшенні витрати

повітря, температури по всьому об'ємові касети зменшуються, проте перепад температури збільшується.

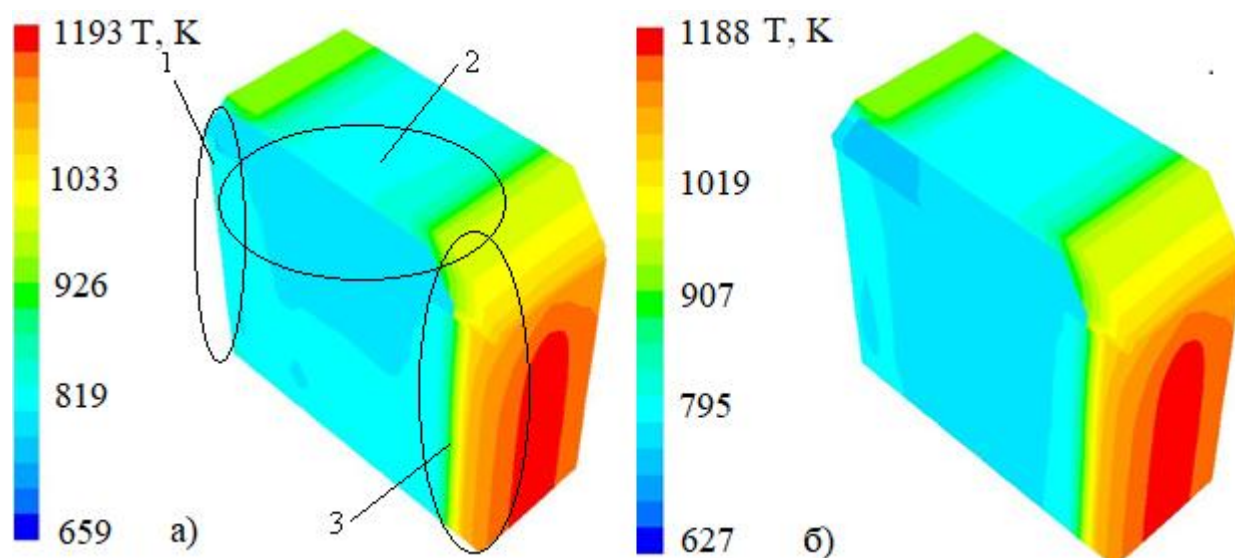


Рисунок 2.2. Температурні поля касети наприкінці охолодження повітрям: а)– при надлишку $a = 1,1$, б) – надлишку $a = 1,2$

З рис. 2.2.а видно наявність трьох особливих зон печі. Зона 1 – «холодна зона» печі, зона печі, де температура досягає мінімуму. Наявність цієї зони обумовлена розташуванням тут газового каналу через який подається повітря. Саме тут починається охолодження касети, а тому і значення температур тут найменше.

Зона 2 – «підсклепінчата зона» печі. Особливість цієї зони полягає у її розташуванні. У зв'язку з тим, що під склепінням печі завжди знаходиться велика кількість повітря, то і охолодження зони 2 відбувається досить інтенсивно у порівнянні з іншими частинами касети.

Зона 3 – «гаряча зона» печі. Наявність даної зони обумовлена значною акумуляцією теплоти стінкою печі та її повільним охолодженням повітрям, температура якого значно вище у зв'язку з його нагріванням через проходження газового тракту печі. Тому і охолодження у цій зоні відбувається найдовше.

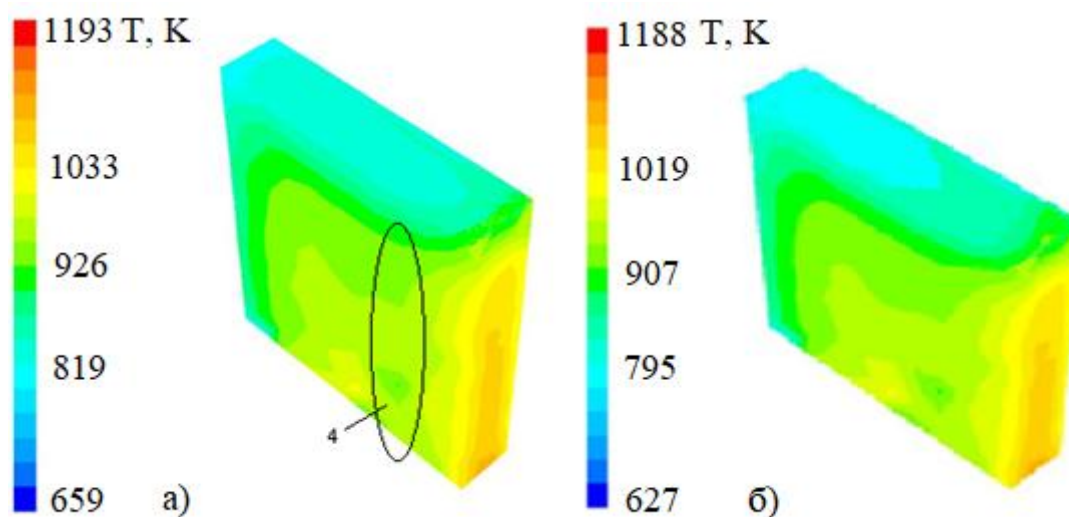


Рисунок 2.3. Температурні поля пересипки наприкінці охолодження повітрям: а) – при надлишку $a = 1,1$, б) – надлишку $a = 1,2$

На рис. 2.3. наведено температурні поля пересипки наприкінці процесу охолодження при надлишку повітря $a = 1,1$ та $a = 1,2$. Як і у попередньому випадку прослідковується наявність характерних зон печі, що описані вище. Додатково виділяється четверта зона, що знаходиться ближче до гарячого краю печі, проте температури у цій зоні значно нижче. Це пояснюється особливістю руху повітря у газовому тракті (див рис. 2.4).

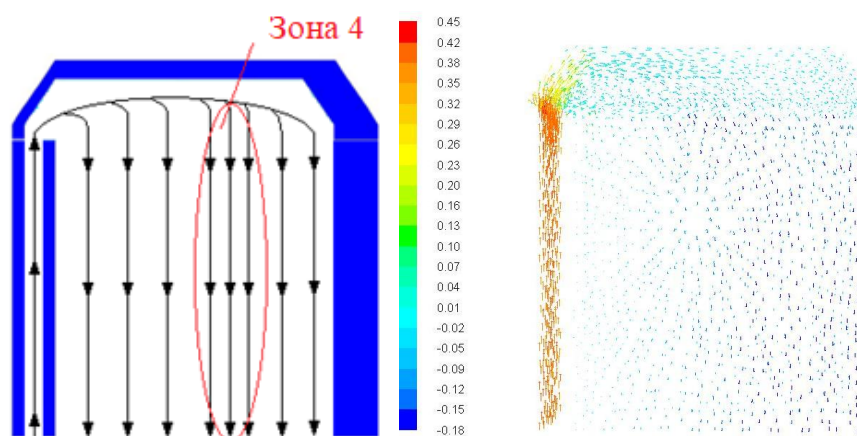


Рисунок 2.4. Схематичне зображення руху повітря по газовому тракту печі випалювання

Результати дослідження показують, що температурні поля в обох випадках майже однакові та відрізняються лише абсолютними значеннями температур. Величина перепаду температур по всьому об'ємові пересипки складає близько 300 К.

Охолодження проходить інтенсивніше ближче до «холодної зони» та повільніше біля «гарячої зони» печі, що у першу чергу і обумовлює перепад температур по горизонталі. Наявність «підсклепінчатої зони» печі та нагрівання повітря при проходженні газових трактів обумовлює перепад температур по вертикалі. Очевидний значний вплив зони 4 на температуру по заготовці №4. Описані результати підтверджуються рис. 2.5.

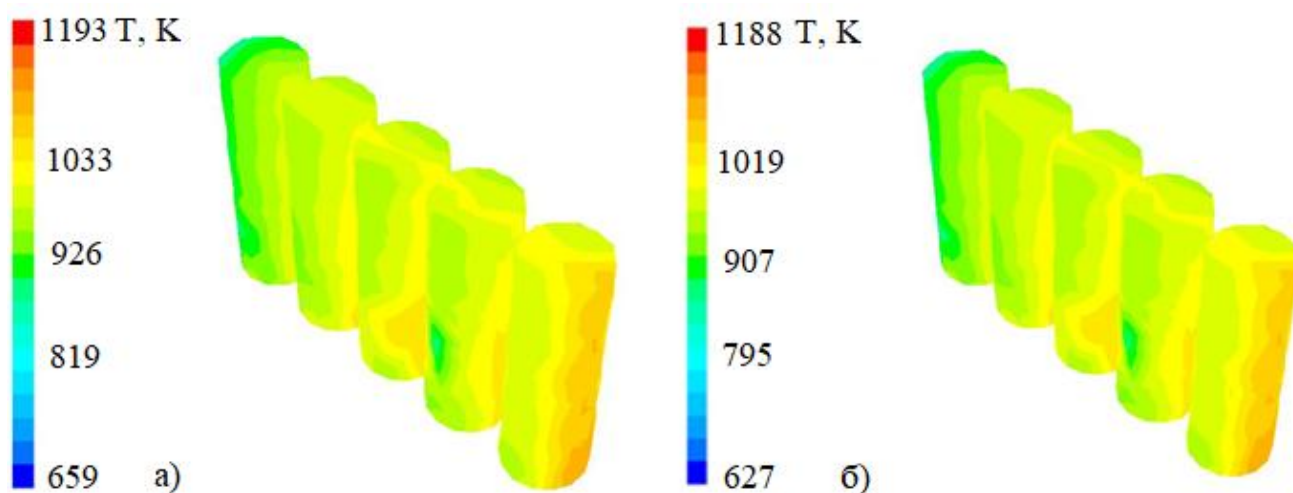


Рисунок 2.5. Температурні поля заготовок наприкінці охолодження повітрям: а) – при надлишку $a = 1,1$, б) – надлишку $a = 1,2$

У роботах [5-6] для більш повної характеристики уявлення про процес охолодження заготовок представлені графіки змін максимальних та мінімальних температур по кожній з заготовок при різній витраті повітря. Середня швидкість охолодження при надлишку $a = 1,1$ складає 2,63 К за годину, при надлишку $a = 1,2$ – 2,76 К за годину.

На рис. 2.6 побудовано гістограми мінімальних та максимальних температур по всім заготовкам наприкінці процесу охолодження при коефіцієнті надлишку повітря $a = 1,1$ та $a = 1,2$.

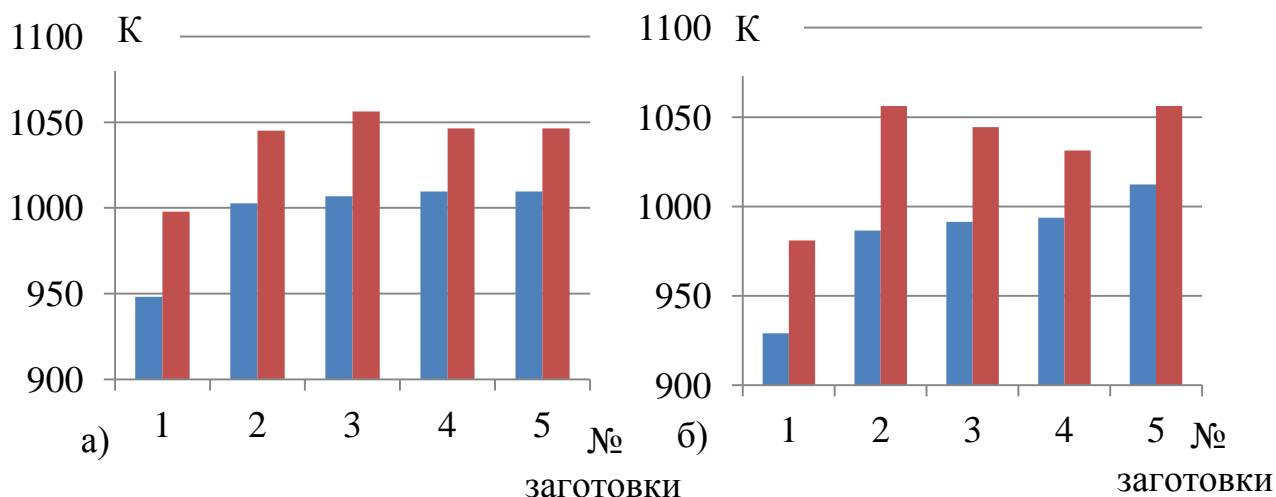


Рисунок 2.6. Гістограми мінімальних та максимальних значень температури по заготовкам наприкінці охолодження повітрям: а) – при надлишку $a = 1,1$, б) – надлишку $a = 1,2$

За результатами останнього дослідження можна зробити висновки, що охолодження заготовки №4 відбувається інтенсивніше, ніж заготовки №3, хоча вона розташована ближче до гарячої зони печі. Це показує вплив збільшення надлишку повітря на четверту зону печі.

З описаних вище результатів обох досліджень видно, що інтенсивне охолодження заготовок відбувається з 10-13 години, очевидно саме стільки часу необхідно, щоб охолодити пересипку та стінки газового тракту.

Отримані результати числового моделювання показують, що протягом перших 3-4 годин відбувається нагрівання заготовок орієнтовно на 1-4 К. Це, в свою чергу, дозволяє говорити про можливість використання ефекту «довипалювання» після камери під вогнем.

Відповідно до розрахунків видно, що при збільшенні витрати повітря збільшується перепад температур по заготовкам, що ілюструється гістограмою 2.7. Середнє значення перепаду температур при $a = 1,1$ складає 42,97 К, а при $a = 1,2$ складає 51,23 К.

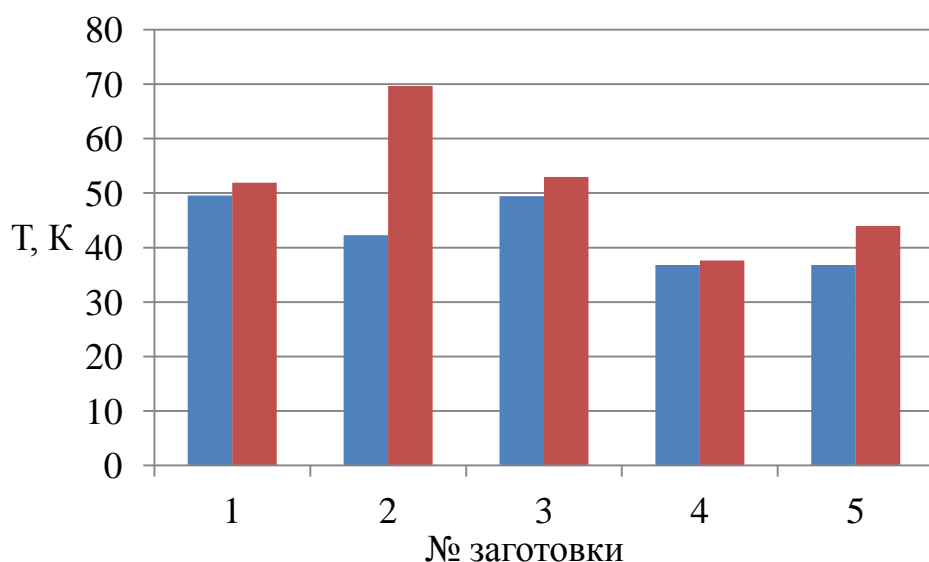


Рисунок 2.7. Гістограма перепаду температур по заготовкам при надлишку повітря $a = 1,1$ та $a = 1,2$

З урахуванням того, що одним з показників етапу охолодження є температура повітря на виході касети, то потрібно дослідити вплив надлишку повітря на даний параметр. Отримані результати зміни температури повітря на виході з касети впродовж всього етапу охолодження наведені на рис 2.8. З наведених результатів видно, що при меншій витраті повітря його температура на виході більша, ніж при більшій витраті.

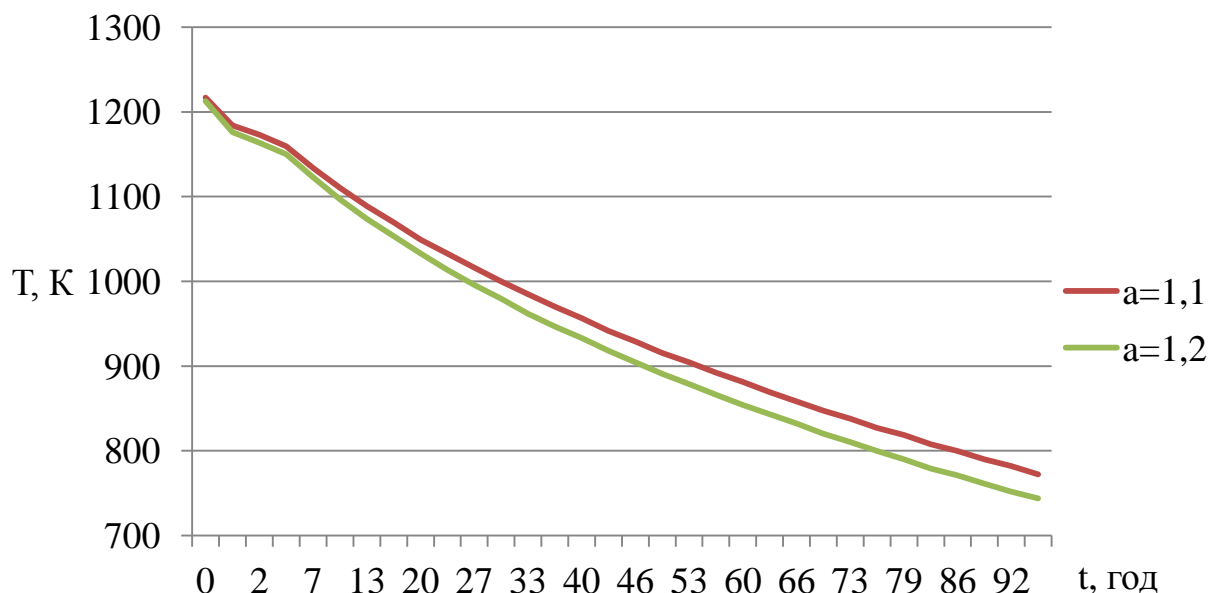


Рисунок 2.8. Графік зміни середньої температури повітря на виході з касети при надлишку $a = 1,1$ та $a = 1,2$

Наведені результати не дають можливості оцінити вплив зміни повітря, адже зменшення витрати компенсується збільшенням температури і навпаки. Саме тому пропонується розглядати описані результати через кількість теплоти:

$$Q_{нов} = L_a i'_{нов}$$

де L_a - кількість повітря що подається для горіння палива, $i'_{нов}$ - ентальпія повітря (залежить від температури)

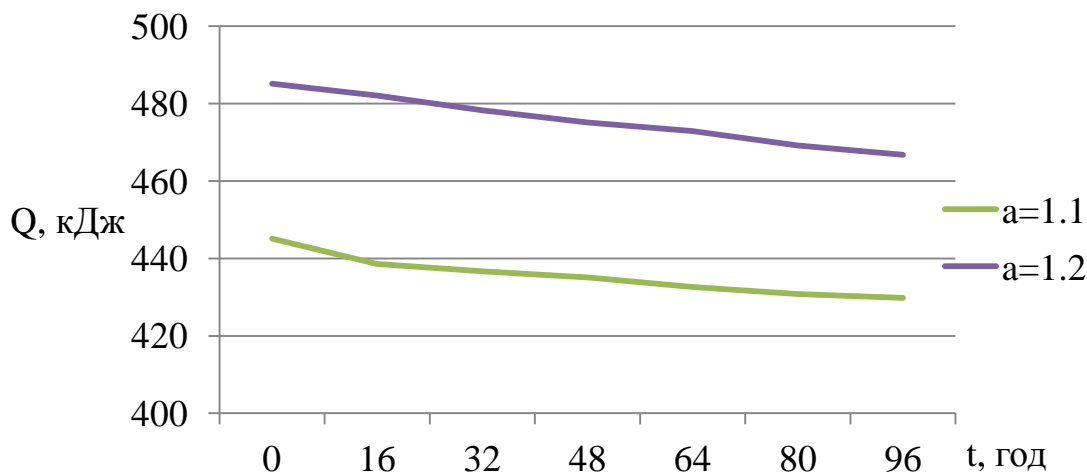


Рисунок 2.9. Графік зміни кількості теплоти що виноситься з камери печі від часу охолодження

Очевидно, що при надлишку повітря $a = 1,2$ кількість теплоти, винесеної з повітрям, значно вище, що позитивно впливає на інтенсивність охолодження.

Також можна сказати, що позитивним моментом є те, що більше теплоти буде внесено у камеру, що знаходиться під вогнем. Проте одночасно негативним моментом є подача на спалювання повітря з меншою температурою, що призведе, у свою чергу до меншої температури факелу.

Провівши аналогічні дослідження процесу з надлишком повітря $a = 1,05$ та $a = 1,15$ побудуємо графік зміни температури підігрітого повітря у залежності від коефіцієнта надлишку повітря для даних умов.

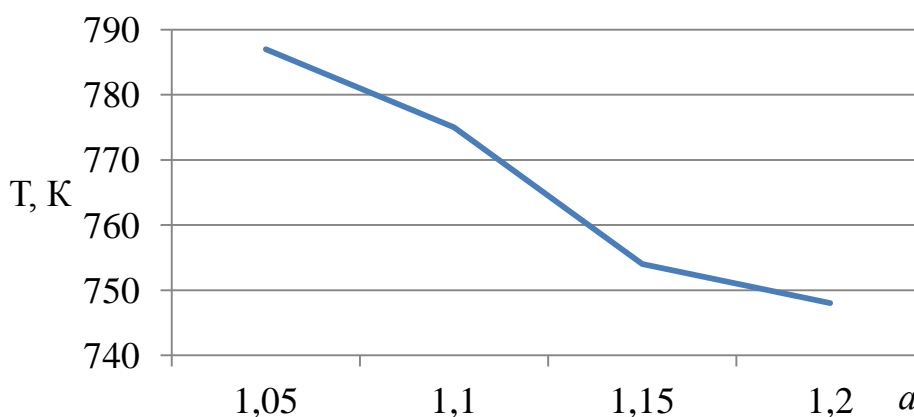


Рисунок 2.10. Графік зміни температури підігрітого повітря від коефіцієнта надлишку повітря

2.2. Нагрівання камери печі димовими газами

Відповідно до порядку проведення досліджень наступним етапом є дослідження процесу нагрівання камери димовими газами, що відходять. Метою даного дослідження є визначення температур заготовок, що у подальшому йдуть на випалювання, та дослідження особливостей процесу нагрівання камери димовими газами, дослідження впливу надлишку повітря, a , у свою чергу, і обсягу продуктів горіння, на температурні поля касети, дослідження впливу розрідження на температурні поля. Приймавши надлишок повітря з попереднього дослідження для ефективного дослідження необхідно провести розрахунок витрати продуктів горіння.

2.3.1. Розрахунок витрати продуктів горіння

При повному згоранні любого палива утворюються продукти горіння у вигляді CO_2 , H_2O , SO_2 та N_2 . Якщо горіння відбувається з надлишком повітря то в димових газах буде присутній кисень. Загальна витрата продуктів горіння при спалюванні палива наступний:

з теоретично потрібною витратою повітря, тобто коли коефіцієнт надлишку повітря $a = 1$

$$V_a = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{H_2O}$$

при надлишку повітря,

$$V_a = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{H_2O} + V_{O_2}$$

де $V_{CO_2}, V_{SO_2}, V_{N_2}, V_{H_2O}, V_{O_2}$ - об'єм продуктів горіння.

Об'єм продуктів горіння для природного газу можна визначити так [4]:

$$V_{O_2} = 0.21L_0(a - 1)$$

$$V_{CO_2} = 0.01(CO_2 + CH_4 + 2C_2H_6 + 3C_3H_8 + 4C_4H_{10} + 5C_5H_{12})$$

$$V_{H_2O} = 0.01(2CH_4 + 3C_2H_6 + 4C_3H_8 + 5C_4H_{10} + 6C_5H_{12} + H_2O + 0.16dL_a)$$

$$V_{N_2} = 0.79L_a + 0.01N_2$$

де $CH_4, C_2H_6 \dots$ - відсоткові відношення, L_0 - теоретично потрібна витрата сухого повітря для горіння, L_a - дійсна витрата сухого повітря.

Загальна витрата продуктів горіння:

$$V_{дгм} = BV_a$$

Для складу газу, наведеного вище, та при надлишку повітря $a = 1,2$ відповідно отримуємо наступне:

$$V_{O_2} = 0.21(1.2 - 1)9.42 = 0.396,$$

$$V_{CO_2} = 0.01(0.2 + 93 + 2 \cdot 1.2 + 3 \cdot 0.7 + 4 \cdot 0.4 + 5 \cdot 0.2) = 1.003,$$

$$V_{H_2O} = 0.01(2 \cdot 93 + 3 \cdot 1.2 + 4 \cdot 0.7 + 5 \cdot 0.4 + 6 \cdot 0.2 + 1 + 0.16 \cdot 10 \cdot 11.3) = 2.146,$$

$$V_{N_2} = 0.01 \cdot 3.3 + 0.79 \cdot 11.3 = 8.953.$$

Загальна витрата продуктів горіння становить:

$$V_a = (1.003 + 2.146 + 8.953 + 0.396) \cdot 30 = 375 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Для складу газу, наведеного у §3.3.1, та при надлишку повітря $a = 1,1$ відповідно дістаємо:

$$V_{O_2} = 0.21(1.1 - 1)9.42 = 0.198,$$

$$V_{CO_2} = 0.01(0.2 + 93 + 2 \cdot 1.2 + 3 \cdot 0.7 + 4 \cdot 0.4 + 5 \cdot 0.2) = 1.003,$$

$$V_{H_2O} = 0.01(2 \cdot 93 + 3 \cdot 1.2 + 4 \cdot 0.7 + 5 \cdot 0.4 + 6 \cdot 0.2 + 1 + 0.16 \cdot 10 \cdot 10.36) = 2.131,$$

$$V_{N_2} = 0.01 \cdot 3.3 + 0.79 \cdot 10.36 = 8.217.$$

Загальна витрата продуктів горіння становить:

$$V_a = (1.003 + 2.131 + 8.217 + 0.198) \cdot 30 = 346,5 \text{ м}^3/\text{год}.$$

2.3.2. Дослідження впливу надлишку повітря на процес нагрівання камери печі димовими газами

Прийнято, що початкова температура всіх складових касети печі складає 300 К. Температура димових газів та розрідження на камері прийнято відповідно до табл. 1.3. Відповідно до витрати палива 30 м³/год, витрата димових газів при надлишку повітря $a = 1,2$ складає 375 м³/год, при надлишку повітря $a = 1,1$ складає 346,5 м³/год. Число камер на підігріві димовими газами – 4. Розглядається одна касета, що проходить послідовно чотири етапи нагрівання з різними умовами.

У результаті проведеного моделювання (рис. 2.11) на кінець першого етапу нагрівання печі димовими газами при надлишку повітря $a = 1,1$ та $a = 1,2$ при максимальній температурі димових газів 833 К та розрідженні 55 Па отримано: максимальними є температури стінок вогневого колодязя, що складають 557 К при $a = 1,2$, а при $a = 1,1$ досягає 549 К; мінімальні температури - температури протилежних стінок при $a = 1,2$ складає 332 К, при $a = 1,1$ становить 330 К. Відповідно перепад температур по всьому об'ємові касети складає 225 К та 219 К. При збільшенні витрати димових газів температури по всьому об'ємові касети збільшується, проте збільшується і перепад температур. Як і у попередньому дослідженні прослідковується наявність характерних зон печі.

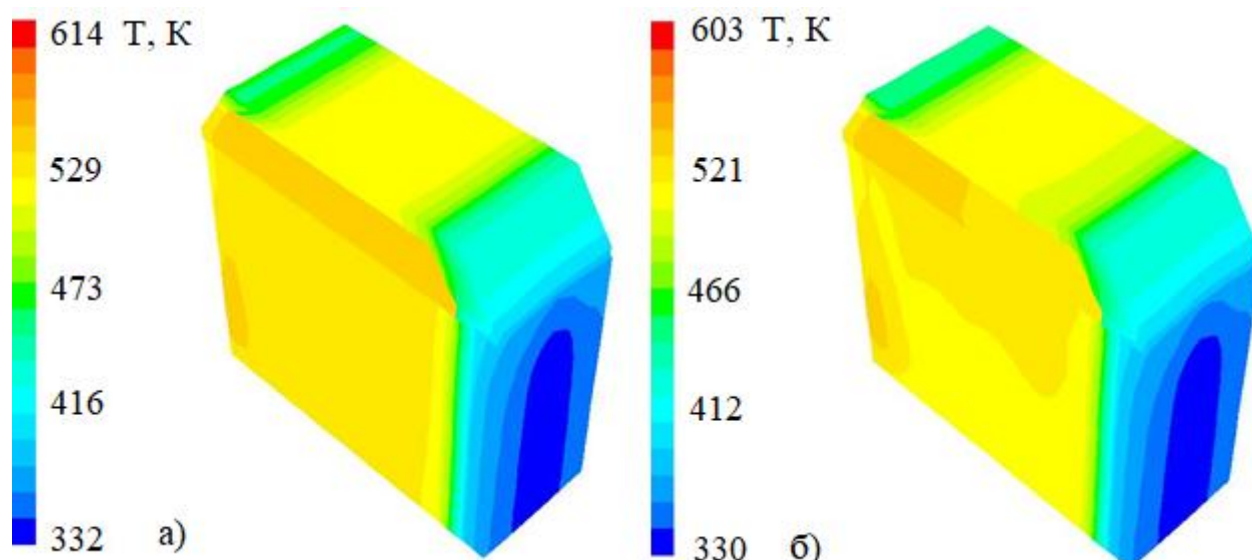


Рисунок 2.11. Температурні поля касети при нагріванні димовими газами наприкінці першого етапу: (а) при надлишку повітря $a = 1,2$; (б) при надлишку повітря $a = 1,1$

Результати дослідження температурних полів пересипки наприкінці першого етапу нагрівання при надлишку повітря $a = 1,2$ та $a = 1,1$ показали, що температурні поля в обох випадках майже однакові та відрізняються лише значеннями температур. Перепади температур по всьому об'ємові пересипки досить значні та становлять близько 170 К. Результати моделювання демонструються на рис 2.12.

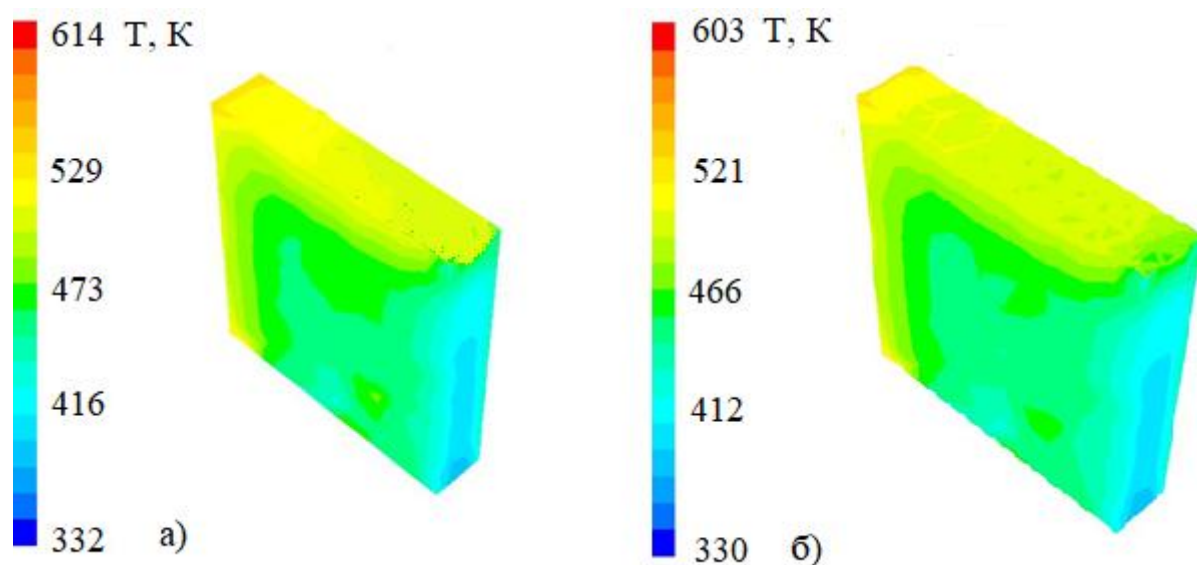


Рисунок 2.12. Температурні поля пересипки при нагріванні димовими газами наприкінці першого етапу: (а) при надлишку повітря $a = 1,2$; (б) при надлишку повітря $a = 1,1$

Проведені дослідження показали, що температура заготовок зменшується зверху до низу печі, що логічно пояснюється зменшенням температури димових газів, при проходженні газового тракту камери печі. Очевидним є перепад температури від більш теплої сторони печі до більш холодної. Результати наведені на рис 2.13.

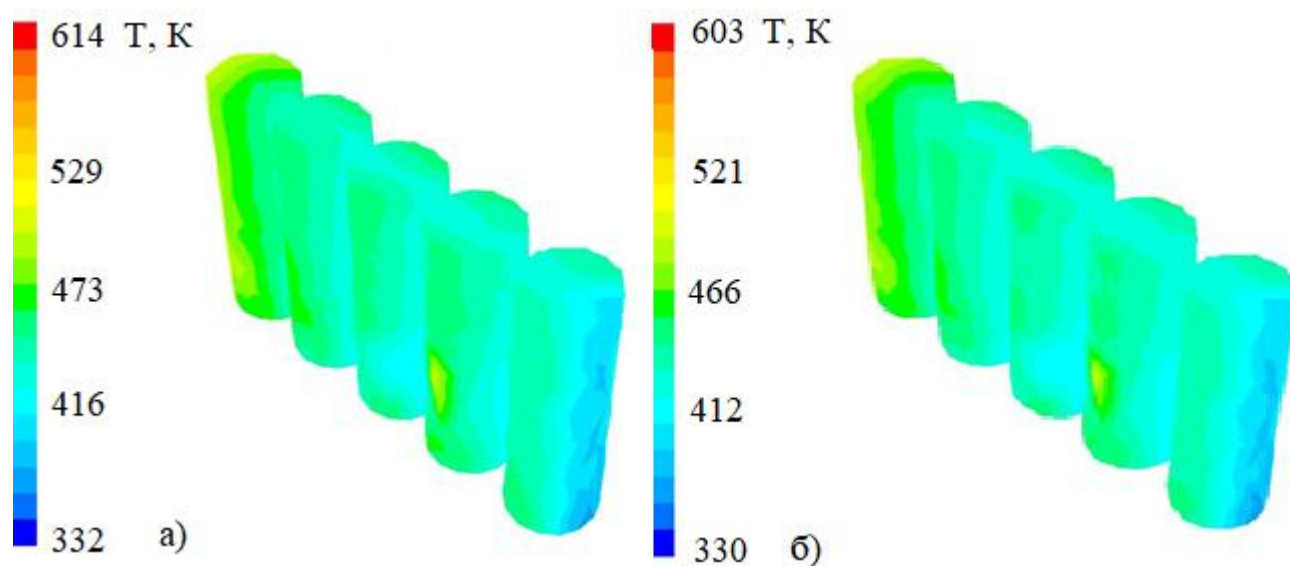


Рисунок 2.13. Температурні поля заготовок при нагріванні димовими газами наприкінці першого етапу: (а) при надлишку повітря $a = 1,2$; (б) при надлишку повітря $a = 1,1$

За результатами чисельного моделювання побудовано гістограми мінімальних та максимальних температур по всіх заготовках для даного етапу (рис. 2.14). З результатів слідує, що середнє значення перепаду температур по всіх заготовках при надлишку повітря $a = 1,2$ складає 17 К, при надлишку повітря $a = 1,1$ складає 15,2 К.

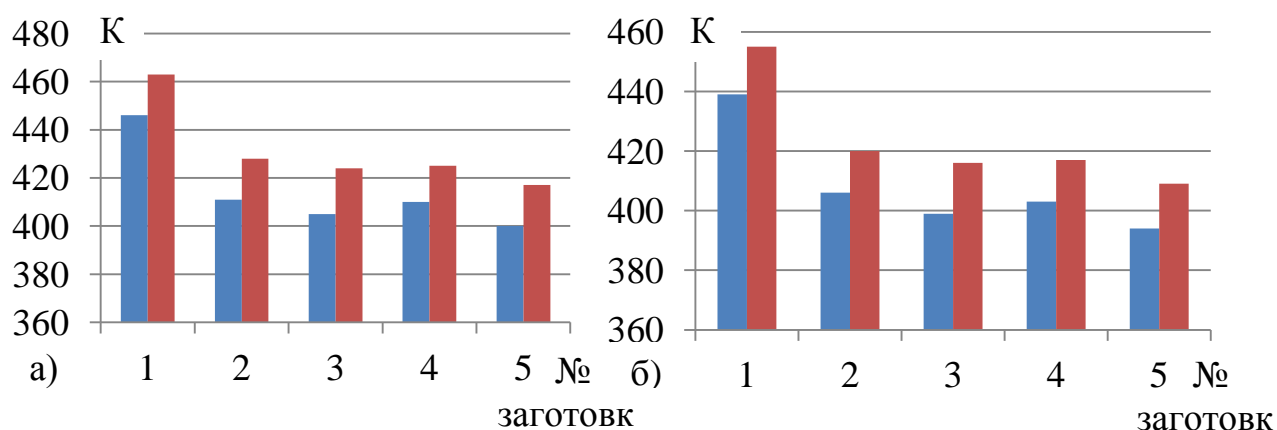


Рисунок 2.14. Гістограма мінімальних та максимальних значень температури по заготовкам на кінець першого етапу: (а) при надлишку повітря $a = 1,2$; (б) при надлишку повітря $a = 1,1$

Процес нагрівання камери димовими газами відбувається у декілька етапів, що залежать від кількості камер, які задіяні у процесі випалювання. В даному випадку розглядається 4 камери, що знаходяться на стадії нагрівання димовими газами. Враховуючи, що кожна камера проходить всі етапи нагрівання димовими газами та значний об'єм матеріалів, результати моделювання наступних етапів наведено у табл. 2.8.

Таблиця. 2.8 Результати моделювання наступних етапів нагрівання камери димовими газами

Назва параметру		
Надлишок повітря	$a = 1,2$	$a = 1,1$
Етап 2 при максимальній температурі димових газів 953 К та розрідженні 39 Па		
Максимальна температура стінок вогневого колодязя	666 К	654 К
Мінімальна температура протилежних вогневим колодязям стінок	423 К	416 К
Перепад температури по всьому об'ємові касети	243 К	238 К
Перепади температур по всьому об'ємові	180 К	180 К

пересипки		
Середнє значення перепаду температури по всіх заготовках	18,8 К	17,4 К
Етап 3 при максимальній температурі димових газів 1103 К та розрідженні 25 Па		
Максимальна температура стінок вогневого колодязя	805 К	789 К
Мінімальна температура протилежних вогневим колодязям стінок	534 К	523 К
Перепад температури по всьому об'ємові касети	271 К	266 К
Перепади температур по всьому об'ємові пересипки	190 К	190 К
Середнє значення перепаду температури по всіх заготовках	18 К	17,4 К
Етап 4 при максимальній температурі димових газів 1353 К та розрідженні 12 Па		
Максимальна температура стінок вогневого колодязя	967 К	948 К
Мінімальна температура протилежних вогневим колодязям стінок	663 К	647 К
Перепад температури по всьому об'ємові касети	305 К	301 К
Перепади температур по всьому об'ємові пересипки	210 К	210 К
Середнє значення перепаду температури по всіх заготовках	17 К	22,6 К

У роботах [7-9] для більш повної характеристики процесу нагрівання заготовок представлені графіки змін максимальних та мінімальних температур по кожній з заготовок протягом всіх чотирьох етапів нагрівання димовими газами.

За результатами чисельного моделювання побудовано гістограми мінімальних та максимальних температур по всіх заготовкам наприкінці четвертого етапу нагрівання камери печі димовими газами (рис 2.15). З результатів видно, що середнє значення перепаду температур по всіх заготовках при надлишку повітря $a = 1,2$ складає 17 К, при надлишку повітря $a = 1,1$ складає 22,6 К.

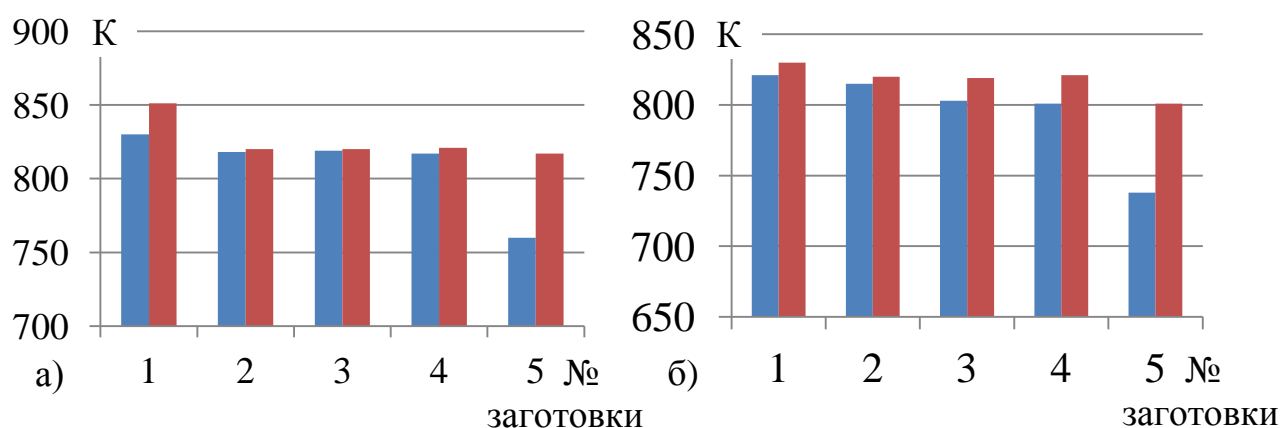


Рисунок 2.15. Гістограма мінімальних та максимальних значень температури по заготовкам на кінець четвертого етапу: а) при надлишку повітря $a = 1,2$; б) при надлишку повітря $a = 1,1$

2.3.3. Дослідження впливу розрідження на нагрівання камери печі димовими газами

Враховуючи, що процес випалювання вуглецевих виробів відбувається при розрідженні, потрібно провести дослідження впливу розрідження на температурні поля камери печі.

Дослідження проводиться над камерою, у яку завантажено 5 заготовок діаметрами 700, 600, 400, 500, 300 мм та висотою 2100 мм. Тривалість випалювання 480 годин при максимальній температурі димових газів, що

подаються у камеру печі, 1300 К. Початкова температура заготовок, пересипки та інших складових печі прийнято 300 К. Розрідження приймається 100 та 200 Па.

Результати моделювання представлені на рис 2.16. З отриманих результатів дослідження видно, що при збільшенні розрідження температура по об'єму печі зменшилась. Найвищими є температури стінок вогневого колодязя 1020 К при розрідженні 200 Па та 1021 К при розрідженні 100 Па, мінімальними є температури протилежної стінки близько 897,13 К та 897,39 К відповідно. Перепад температури по всьому об'ємі камери печі сягає 122,87 та 123,61 К.

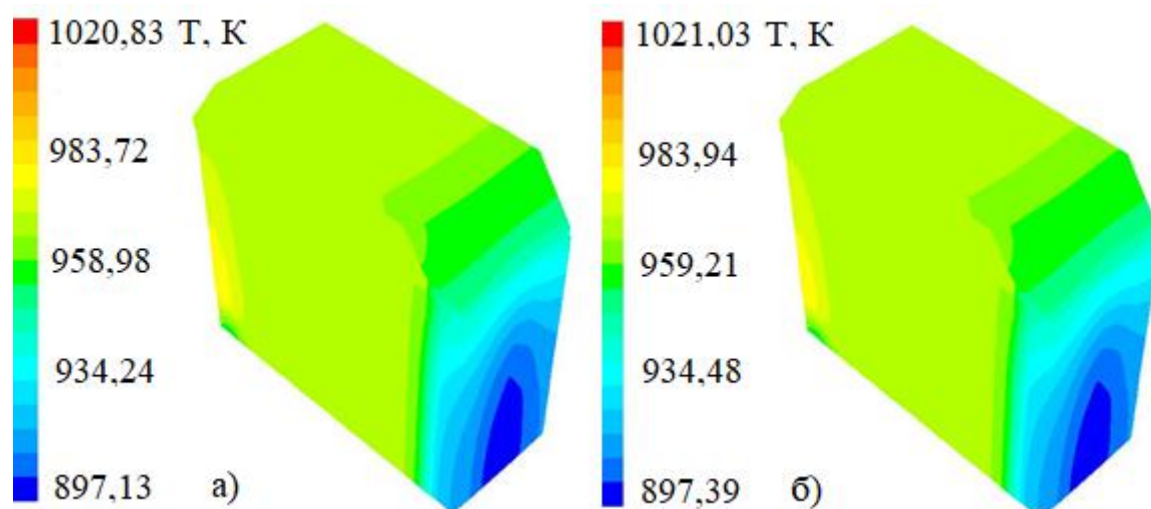


Рисунок 2.16. Загальний вид температурних полів камери печі: а) - при розрідженні 200 Па та б) - 100 Па

У порівнянні з результатами дослідження без розрідження, можна сказати, що перепад температури по всьому об'ємові пересипки незначно зменшився та становить біля 40 К. Проте прослідковується більша однорідність самого температурного поля, що характеризує позитивно підведення розрідження.

Перепад температури по всьому об'ємові пересипки близький по значенням для обох значень розрідження, що говорить про несуттєвий вплив розрідження на температуру пересипки. Результати моделювання наведено на рис 2.17.

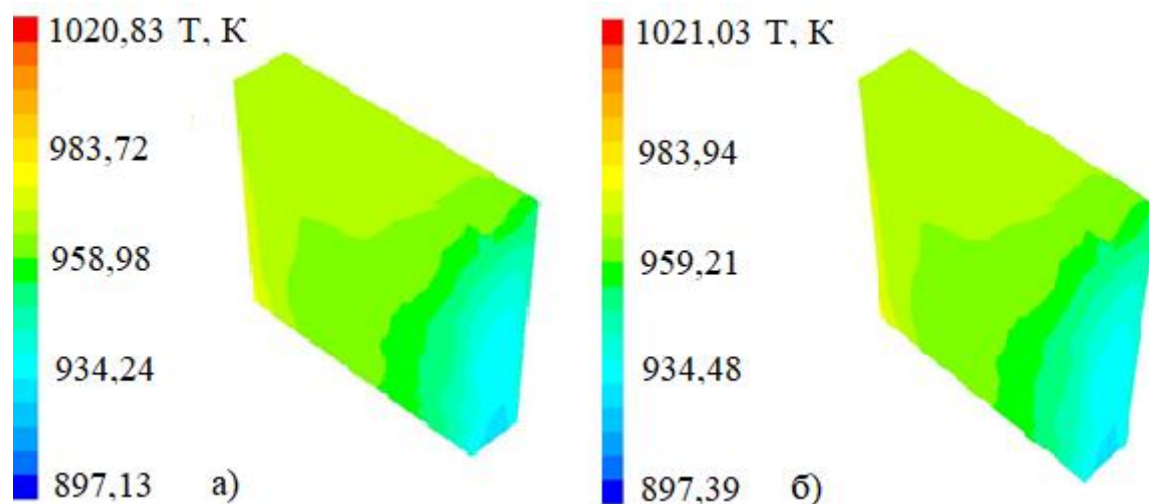


Рисунок 2.17. Температурні поля пересипки: а) - при розрідженні 200 Па та б) - 100 Па

Температура заготовок зменшується зверху до низу печі, що логічно пояснюється зменшенням температури димових газів, при проходженні газового тракту камери печі. Очевидним є перепад температури від більш теплої сторони печі до більш холодної. Збереглися тенденції зменшення температури від більш теплої сторони печі до більш холодної та зверху до низу. Результати числового моделювання температурних полів заготовок представлено на рис 2.18.

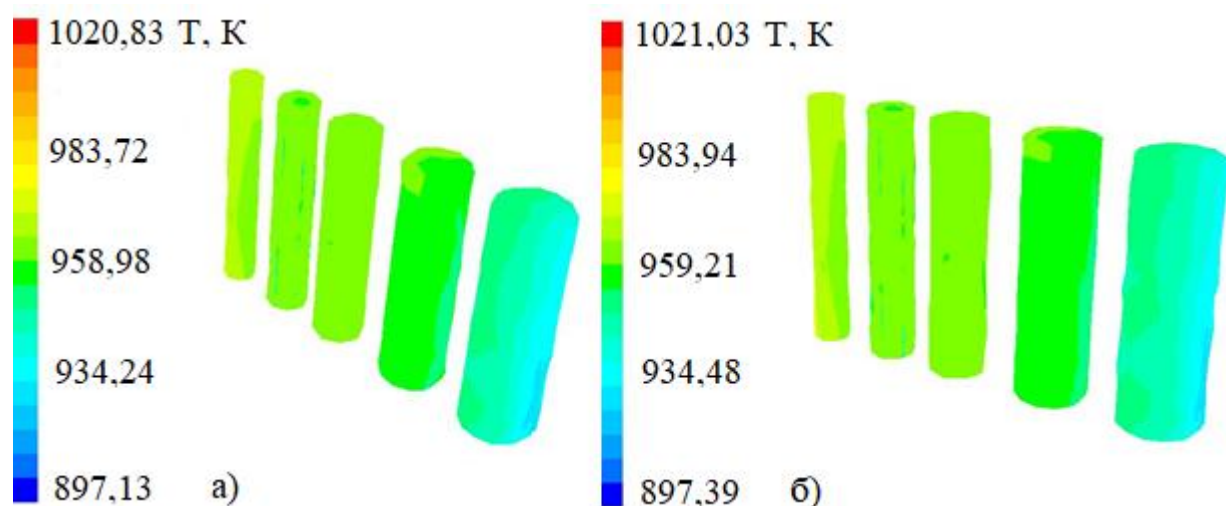


Рисунок 2.18. Температурні поля заготовок: а) - при розрідженні 200 Па та б) - 100 Па

У роботах [10-11] наводяться графіки швидкості росту мінімальної та максимальної температур у заготовках протягом всього процесу нагрівання камери печі.

Наведені результати показують, що підведення розрідження має позитивний ефект. Перепад температури по всьому об'ємі пересипки, і заготовок залишається приблизно таким самим як і при відсутності розрідження. Збільшення швидкості росту мінімальної температури при розрідженні пояснюється більш рівномірним підведенням теплоти до заготовок, що призводить до зменшення розмірів холодних областей.

2.4. Нагрівання камери печі при горінні природного газу

Значний вплив на енерговитрати складають температури палива та повітря. З опису роботи багатокамерних печей випалювання відомо, що потрібне для спалювання газу повітря проходить попередньо через камеру, в якій знаходяться вже випалені електродні заготовки. Таким чином, повітря для спалювання природного газу, нагрівається і подається до камери, що знаходиться «під вогнем» з температурою 250-350 °С. При збільшенні кількості охолоджуваних камер температура повітря підвищується.

Теоретична температура горіння зазвичай розраховується для продуктів повного горіння палива, при умовах, коли все тепло від горіння палива, а також фізичне тепло підігріву палива та повітря передається тільки продуктам горіння. Баланс тепла при цьому може бути виражений формулою [4]:

$$Q_n^p + c_n t_n + c_{нов} t_{нов} = V i_{заг},$$

де Q_n^p - теплотворна здатність палива; c_n - теплоємність палива; t_n - температура палива; $c_{нов}$ - теплоємність повітря; $t_{нов}$ - температура повітря; V - об'єм продуктів горіння; $i_{заг} = c_{заг} \cdot t_{заг}$ - ентальпія продуктів горіння.

З наведеного вище видно, що у результаті попереднього підігріву повітря ентальпія зростає, відповідно температура продуктів горіння збільшується, що у свою чергу призводить до можливості зменшення затрати природного газу при забезпеченні потрібного температурного режиму.

Результати розрахунків зміни температури горіння у залежності від температури підігрітого повітря показані на рис 2.19.



Рисунок 2.19. Залежність зміни температури горіння від зміни температури повітря

Зрозуміло, що компенсація зменшення витрати природного газу підігрітим повітрям, яке йде на спалювання, призводить до мінімізації енергозатрат на випалення вуглецевих заготовок.

З описаного вище випливає доцільність проведення досліджень впливу температури підігрітого повітря на температуру горіння та температурні поля камери печі.

2.4.1. Дослідження впливу розрідження на процес нагрівання камери печі при горінні природного газу

Прийнято, що початкова температура усіх складових касети печі становить 815 К. Розрідження у камері прийнято відповідно до табл. 1.3, а саме 5 та 10 Па. Температура природного газу та повітря прийнято 300 К. Відповідно до витрати палива 30 м³/год витрата повітря при надлишку $a = 1,2$ складає 339 м³/год, при надлишку $a = 1,1$ становить 310,8 м³/год. Число камер на етапі «камера під вогнем» - 1.

Результати чисельного моделювання наведені на рис 2.20. З результату дослідження видно, що при збільшенні розрідження мінімальна температура по об'єму печі зменшилась, а максимальна збільшилась. Очевидно, що при збільшенні розрідження швидкість димових газів зростає, а тому і нагрівання відбувається швидше.

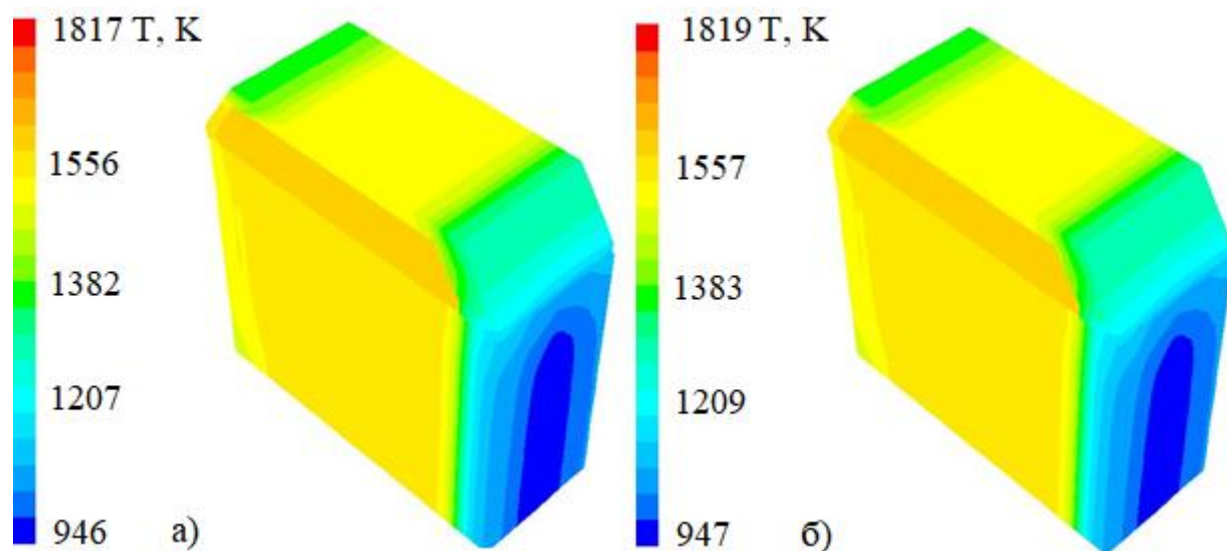


Рисунок 2.20. Температурні поля камери печі на етапі камера під вогнем: а) при розрідженні 50 Па, б) при розрідженні 100 Па

Результати моделювання температурних полів пересипки показані на рис 2.21. У порівнянні з меншим значенням розрідження, можна сказати що перепад температури по всьому об'ємові пересипки незначно змінився від зміни розрідження та становить близько 430 K. Проте прослідковується значна однорідність самого температурного поля, що характеризує позитивно підведення розрідження.

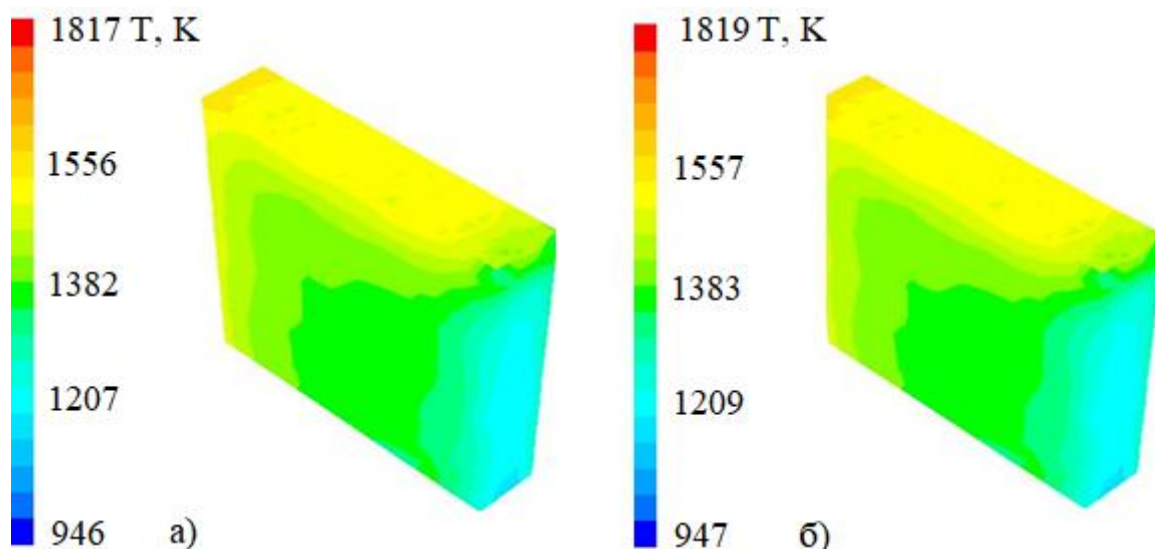


Рисунок 2.21 Температурні поля пересипки на етапі камера під вогнем: а) при розрідженні 50 Па, б) при розрідженні 100 Па

На рис. 2.22 показані температурні поля заготовок на етапі «камера під вогнем». Як і у попередніх дослідженнях збереглися тенденції зменшення температури від більш теплої сторони печі до більш холодної та зверху до низу.

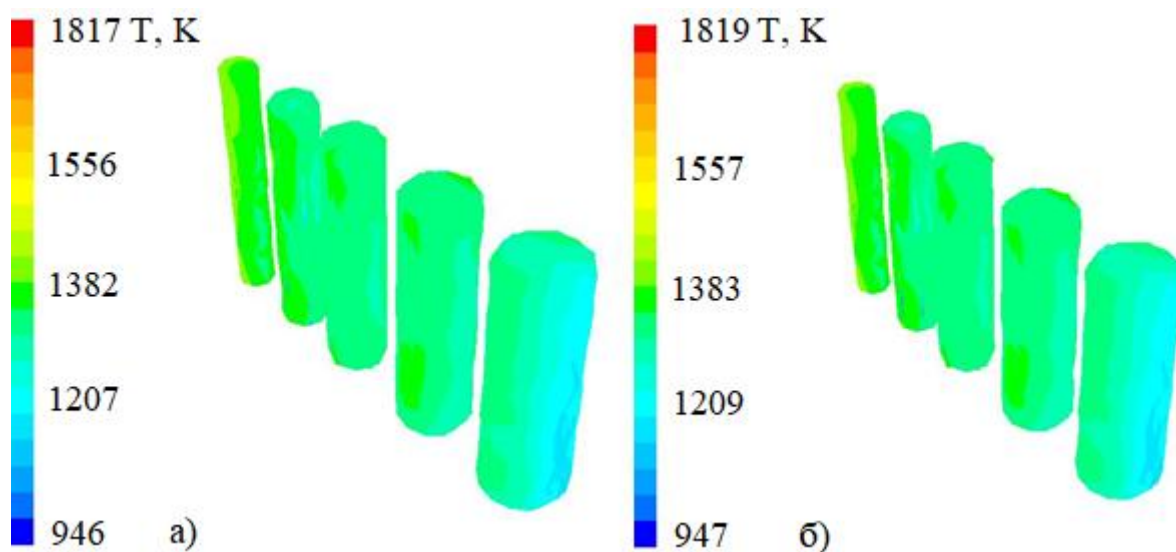


Рисунок 2.22. Температурні поля заготовок на етапі камера під вогнем: а) при розрідженні 50 Па, б) при розрідженні 100 Па

При збільшенні розрідження вміст кисню збільшується рис. 2.23 а вміст CO_2 зменшується рис. 2. 24. Це пояснюється збільшенням швидкості газів, при збільшенні розрідженням, та зменшенням обсягів реагентів, що вступають у реакцію горіння, що призводить до збільшення вмісту кисню та зменшення вмісту

CO₂ у продуктах горіння. З чого можна зробити висновок, що збільшення розрідження негативно впливає на процес горіння природного газу.

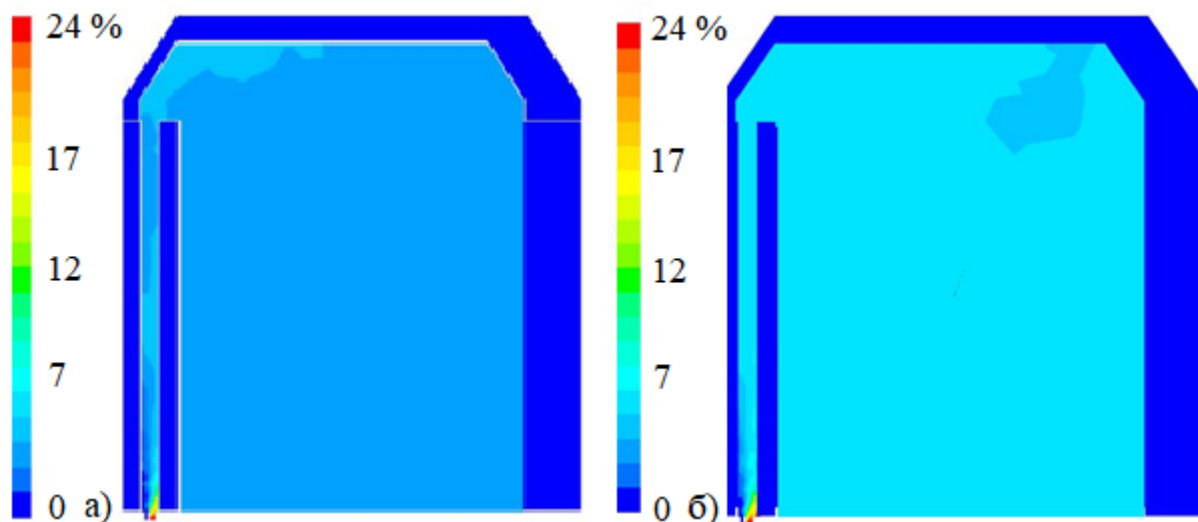


Рисунок 2.23. Масова доля кисню: а) при розрідженні 50 Па, б) при розрідженні 100 Па

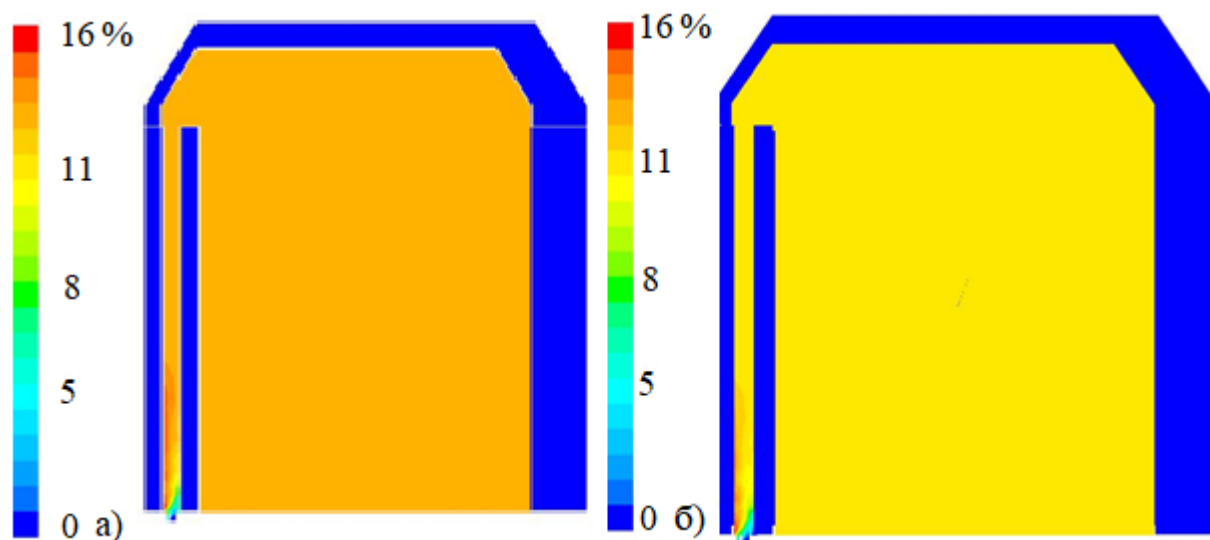


Рисунок 2.24. Масова доля CO₂: а) при розрідженні 50 Па, б) при розрідженні 100 Па

У роботах [12-13] наводяться графіки швидкості росту мінімальної та максимальної температур у заготовках протягом всього процесу нагрівання камери печі.

2.4.2. Дослідження впливу надлишку повітря на процес нагрівання камери печі при горінні природного газу

Приймаємо тривалість випалювання 480 годин при надлишку повітря $a = 1,2$. Початкова температура повітря, природного газу, заготовок, пересипки та інших складових печі - 300 К. Вміст у природному газі CH_4 прийнято 96 %, вміст кисню у повітрі - 24 %. Розрідження на виході з камери 50 Па.

На рис. 2.25 наведено температурне поле камери печі при надлишку повітря $a = 1,2$. Як і у попередніх дослідженнях прослідковується наявність холодної області печі. Прогрівання камери більш однорідне у порівнянні з підігрівом камери димовими газами, що обумовлене значним підводом теплоти та довготривалістю кампанії.

Найвищою є температура стінок вогневого колодязя (близько 1360 К), мінімальною є температура протилежної стінки (близько 1280 К). Перепад температури по всьому об'ємі камери печі сягає 80 К.

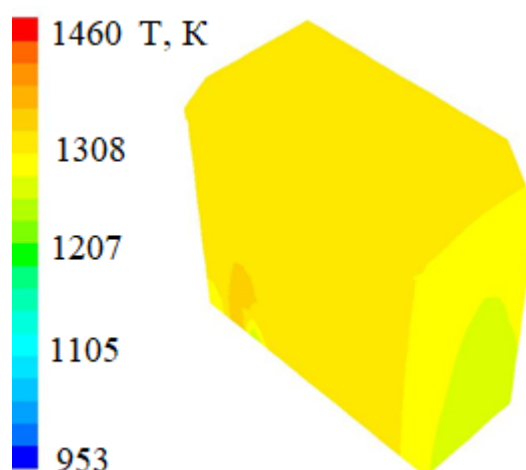


Рисунок 2.25 Температурне поле камери печі наприкінці кампанії випалювання при розрідженні 50 Па при температурі повітря 300 К та надлишку $a = 1,2$

Максимальний горизонтальний перепад температури по середині камери при розрізі навпіл становить 76 К, а вертикальний 26 К (рис. 2.26). Незначний перепад температури по камері печі пояснюється наявністю розрідження та надлишку повітря, що обумовлює додатковий тиск по об'ємі камери у результаті горіння палива.

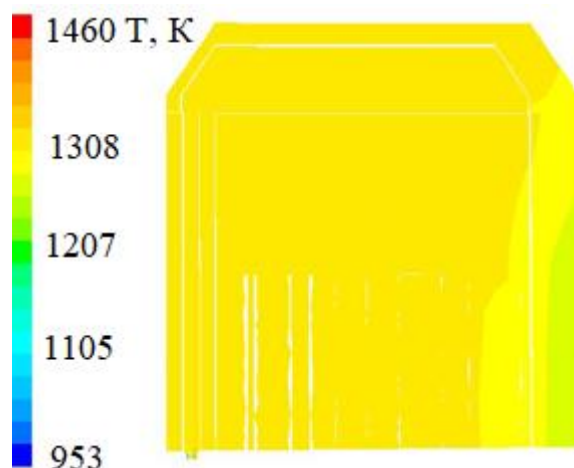


Рисунок 2.26 Температурне поле при зрізі на половині камери печі при розрідженні 50 Па при температурі повітря 300 К та надлишку $a = 1,2$

Як випливає з результатів моделювання, показаних на рис 2.27, у температурному полі пересипки прослідковується наявність незначних гарячої та холодної областей. Перепади температур по всьому об'ємові пересипки незначні та становлять близько 30 К.

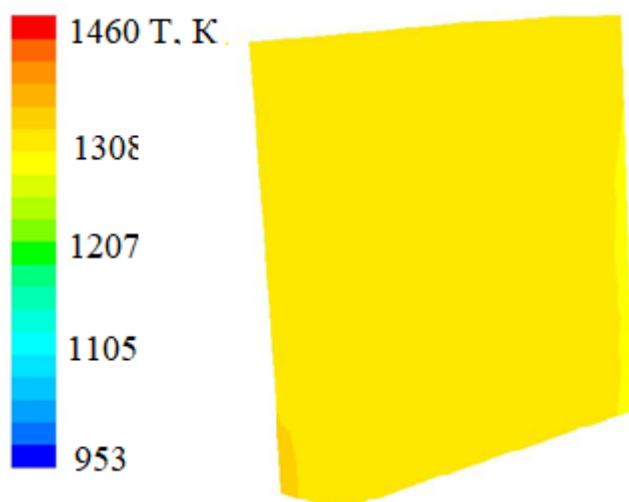


Рис 2.27 Температурне поле пересипки при розрідженні 50 Па при температурі повітря 300К та надлишку $a = 1,2$

У результаті повного прогріву камери печі присутній перепад температур по всьому об'ємові заготовок (рис. 2.28). Температура заготовок приймає значення 1283-1359 К.

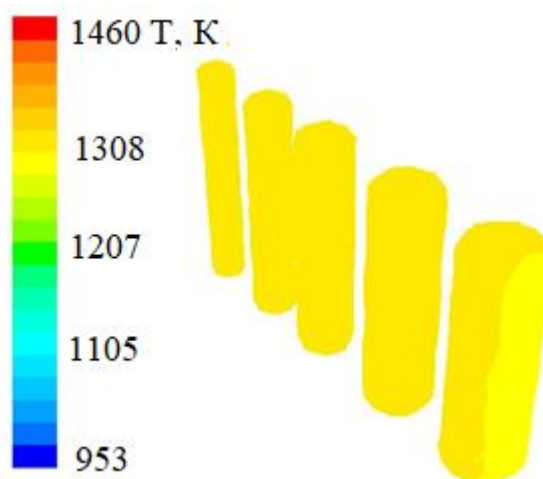


Рисунок 2.28. Температурні поля заготовок при розрідженні 50 Па при температурі повітря 300 К та надлишку $\alpha = 1,2$

З графіків видно, що підвід теплоти до заготовок у порівнянні з підігрівом димовими газами відбувається значно інтенсивніше. Мінімальні температури по всім заготовкам досягли температури 1300 К, що відповідає головній вимозі кампанії випалювання.

Графіки швидкості росту мінімальної та максимальної температури по газовому середовищі камери печі показані на рис. 2.29. Аналізуючи графіки можна зробити висновок, що мінімальна та максимальна температура стрімко змінюються у діапазоні 10-60 годин. Це можна пояснити тим, що саме у цей період часу відбувається процес нагрівання стінок вогневого колодязя. При цьому газ, який ще не згорів, та повітря підігріваються за рахунок акумульованої теплоти стінок колодязя та процес горіння відбувається не з початковою температурою 300К, а дещо вище. Після повного підігріву стінок вогневого колодязя (після 60 годин) значної зміни температури по газовому середовищу не відбувається.

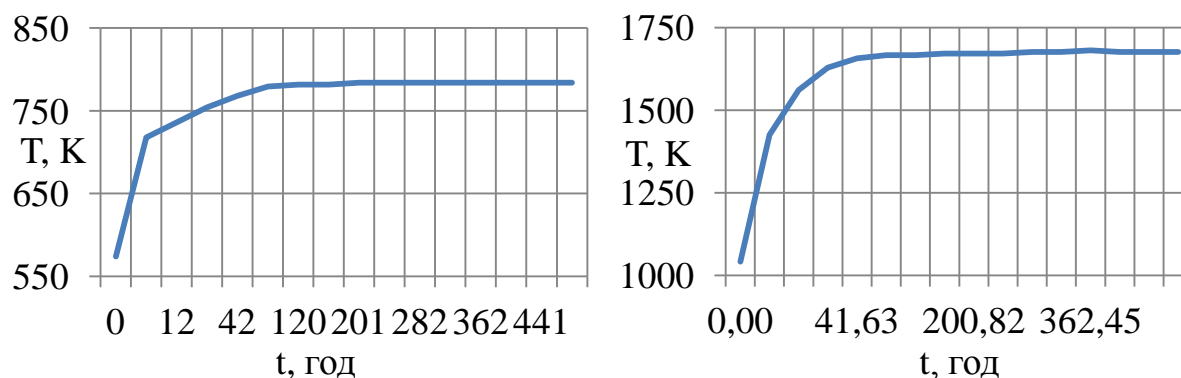


Рисунок 2.29 Графіки швидкості росту мінімальної та максимальної температури по газовому середовищі камери

Масова доля CH_4 приймає максимальне значення лише у вогневому колодязі, де саме і відбувається його горіння. Той факт що на виході з камери печі вміст CH_4 складає 0% підтверджує факт повного згорання палива (рис.2.30).

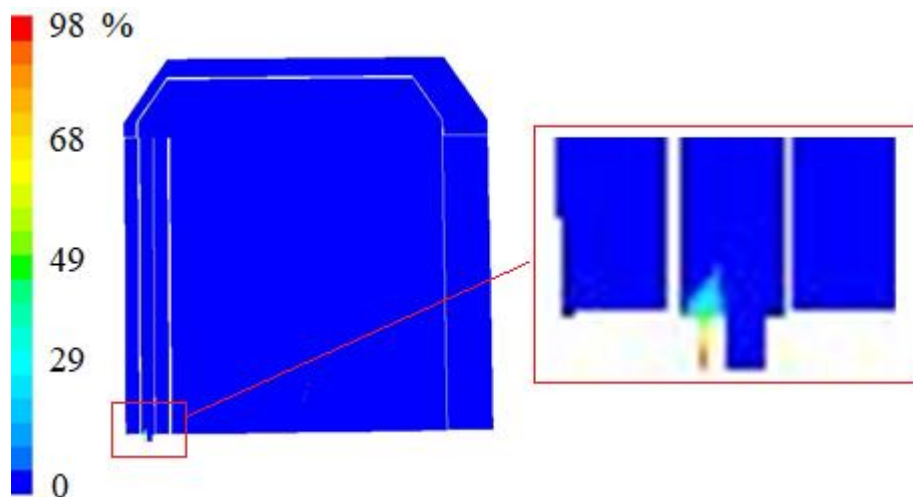


Рисунок 2.30. Масова доля CH_4 при надлишку повітря $a = 1,2$

Мінімальне значення вмісту кисню спостерігається у зоні інтенсивного горіння палива (Рис 2.31). Проте по всьому об'ємові газового тракту вміст кисню зменшується з верхньої частини газового колодязя до виходу з камери. Даний ефект пояснюється допалом продуктів горіння, що підтверджується наступним рисунком (Рис 2.32).

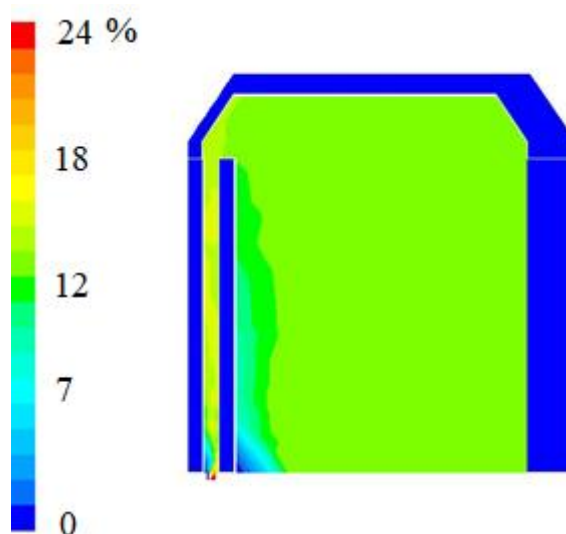


Рисунок 2.31 Масова доля кисню при надлишку повітря $a = 1,2$

При надлишку повітря $a = 1,2$ відбувається повне згорання палива. Проте враховуючи наявність масової долі кисню на виході з печі, можна стверджувати, що надлишок повітря можна зменшити.

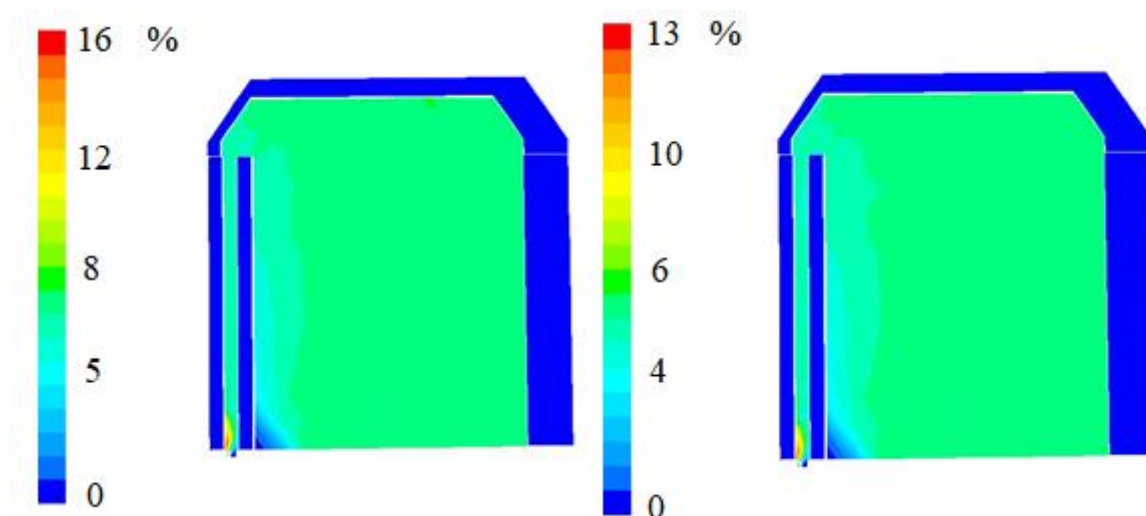


Рисунок 2.32. Масова доля продуктів горіння(CO_2 , H_2O) при надлишку повітря $a = 1,2$

Для порівняння результатів проведено аналогічне дослідження при надлишку повітря $a = 1,1$. Початкова температура повітря, природного газу, заготовок, пересипки та інших складових печі - 300 К. Вміст у природному газі CH_4 прийнято 96 %, вміст кисню в повітрі - 24 %. Розрідження на виході з камери 50 Па.

На рис 2.33 наведено температурне поле камери печі при надлишку повітря $a = 1,1$. У порівнянні з попереднім дослідженням видно, що максимальна температура по всьому об'ємі камери печі вища, ніж при надлишку повітря $a = 1,2$. Це пояснюється тим, що кількість повітря при початковій температурі, що подається в камеру печі, менша відповідно охолодження за рахунок підводу повітря з меншою температурою знижується.

Як і у попередніх дослідженнях існує холодна область печі. Прогрів камери більш однорідний у порівнянні з підігрівом камери димовими газами, що обумовлене значним підводом теплоти та довготривалістю кампанії.

Найвищою є температура стінок вогневого колодязя (близько 1530 K), мінімальною є температура протилежної стінки (близько 1380 K). Перепад температури по всьому об'ємі камери печі сягає 150 K.

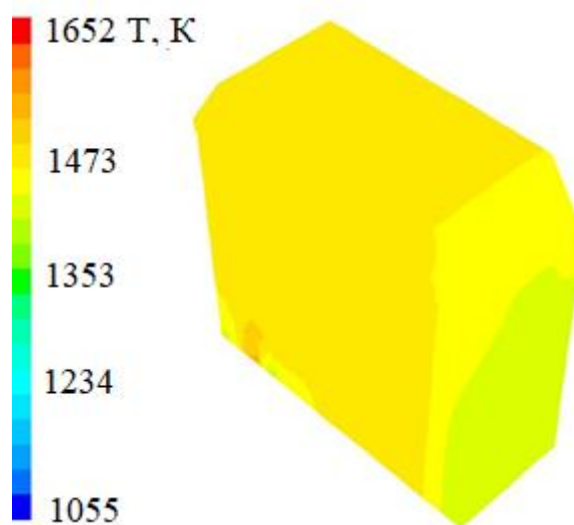


Рисунок 2.33. Температурне поле камери печі наприкінці кампанії випалювання при розрідженні 50 Па при температурі повітря 300 K та надлишку $\alpha = 1,1$

З наведених на рис. 2.34 температурних полів та їх порівнянні з відповідними результатами попереднього дослідження можна зробити висновок, що максимальна температура для даного дослідження значно вище, ніж у попередньому. Проте збільшується неоднорідність температурного поля, що пояснюється збільшенням температури теплоносія та зменшенням його кількості. Горизонтальний перепад температури по середині камери, при розрізі навпіл, становить 120 K, а вертикальний 27 K.

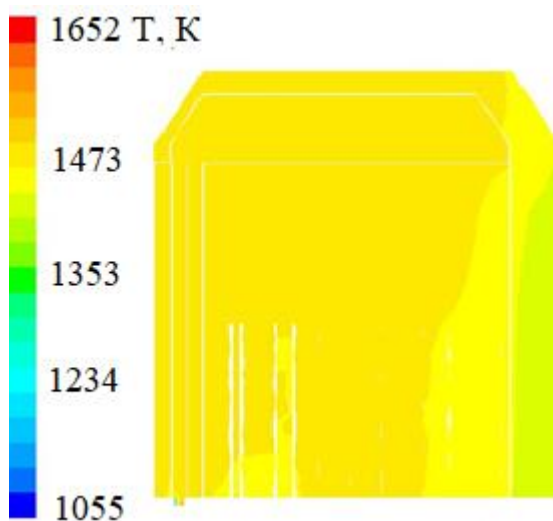


Рисунок 2.34. Температурне поле у зрізі на половині камери печі при розрідженні 50 Па при температурі повітря 300 К та надлишку $a = 1,1$

Як випливає з результатів моделювання, показаних на рис 2.35, у температурному полі пересипки прослідковується наявність незначних гарячої та холодної областей. Максимальне значення температури досягає 1503 К а мінімальне 1443 К. Перепади температур по всьому об'ємові пересипки становлять близько 60 К.

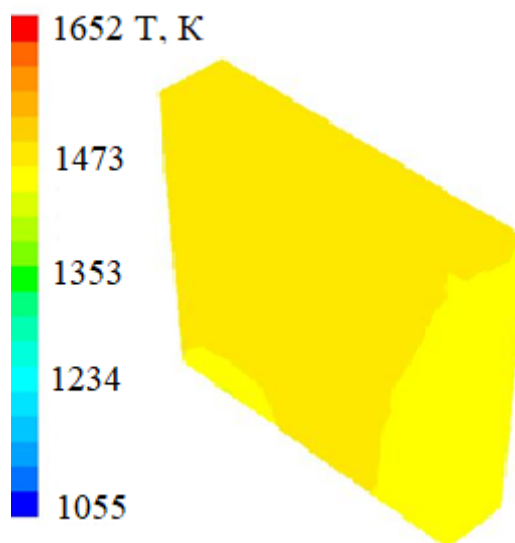


Рисунок 2.35 Температурне поле пересипки при розрідженні 50 Па при температурі повітря 300 К та надлишку $a = 1,1$

На рис. 2.36 наведено температурне поле пересипки. У результаті повного прогріву камери печі присутній перепад температур по всьому об'ємові заготовок (біля 60 К). Температура заготовок приймає значення 1443-1503 К.

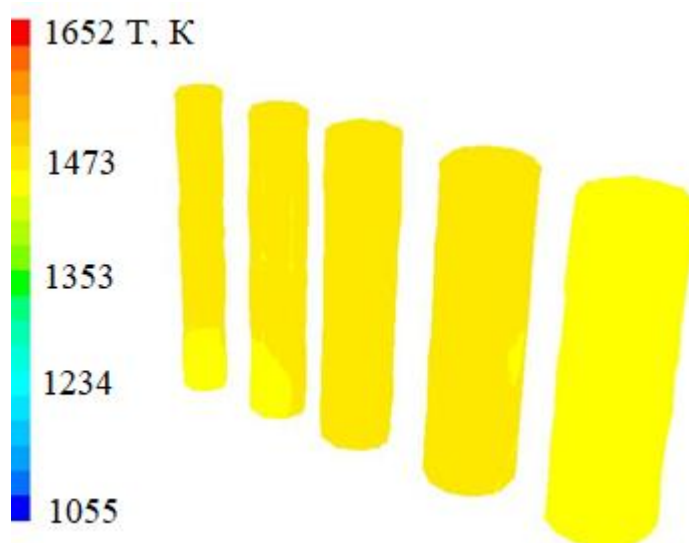


Рисунок 2.36. Температурні поля заготовок при розрідженні 50 Па при температурі повітря 300K та надлишку $a=1,1$

З графіків наведених вище видно, що підвід теплоти до заготовок в порівнянні з попереднім дослідженням відбувається значно інтенсивніше, що пояснюється більшою температурою теплоносія.

Графіки швидкості росту мінімальної та максимальної температури по газовому середовищі камери печі показані на рис.2.37.

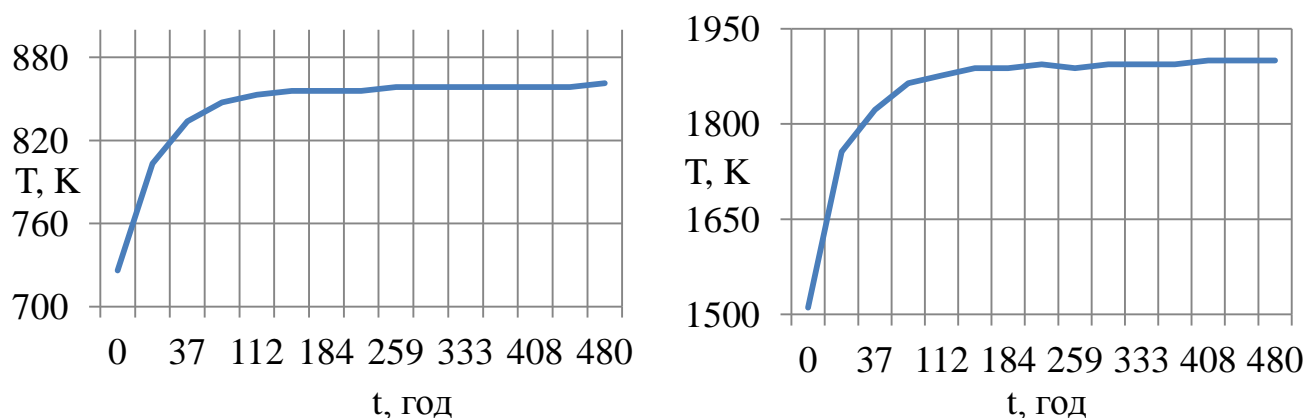


Рисунок 2.37 Графіки швидкості росту мінімальної та максимальної температури по газовому середовищі камери

Як і у попередньому дослідженні видно, що мінімальна та максимальна температура стрімко змінюються в діапазоні 10-60 годин.

Масова доля CH_4 приймає максимальне значення лише у вогневому колодязі, де саме і відбувається його горіння. Той факт що на виході з камери печі вміст CH_4 складає 0% підтверджує факт повного згорання палива (рис.2.38).

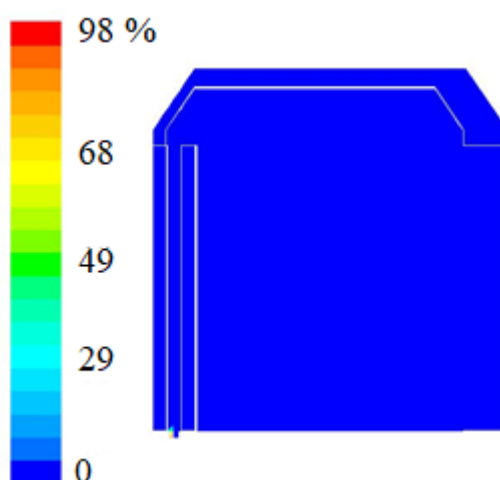


Рисунок 2.38. Масова доля CH_4 при надлишку повітря $a = 1,1$

Мінімальне значення вмісту кисню проглядається в зоні інтенсивного горіння палива (Рис 2.39.). Проте по всьому об'ємові газового тракту вміст кисню зменшується з верхньої частини газового колодязя до виходу з камери. В порівнянні з попереднім дослідженням масова доля кисню на виході з печі складає 8%. З наведеного можна сказати, що можливе зменшення подачі повітря.

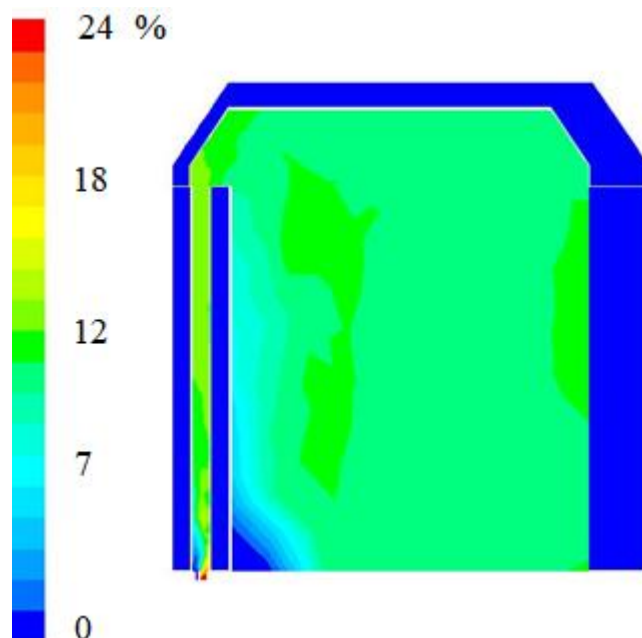


Рисунок 2.39. Масова доля кисню при надлишку повітря $a = 1,1$

Потрібно враховувати той факт, що кількість виходу кисню з камери печі також залежить і від конструкції паливоспалюючих пристроїв, що взагалі не розглядається в даних дослідженнях.

Видно що при надлишку повітря $a = 1,1$ відбувається вихід продуктів горіння значно вище ніж при попередньому дослідженні(рис. 2.40), що позитивно характеризує процес горіння палива.

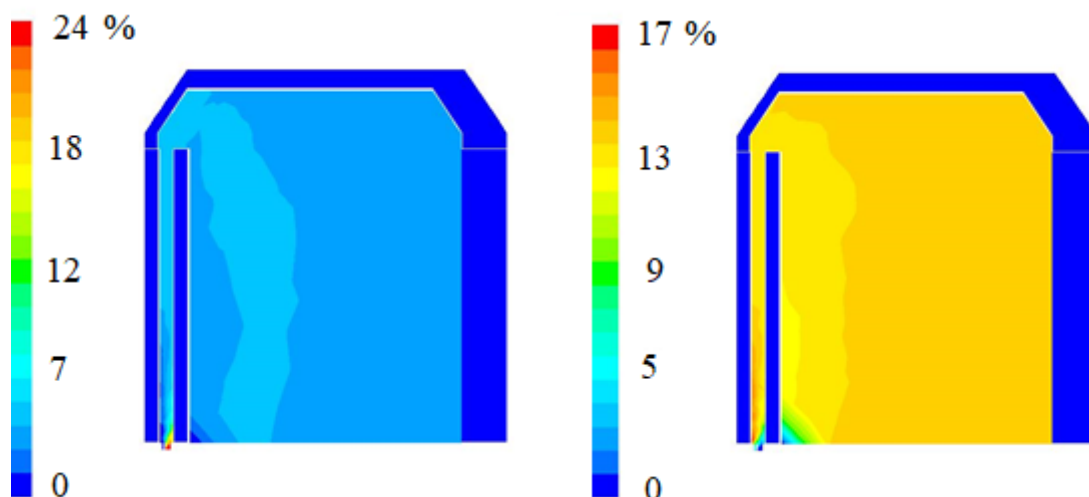


Рисунок 2.40. Масова доля продуктів горіння(CO_2 , H_2O) при надлишку повітря $a = 1,1$

У роботах [14-15] наводяться графіки швидкості росту мінімальної та максимальної температур у заготовках протягом всього процесу нагрівання камери печі.

2.4.3. Дослідження впливу початкової температури на процес нагрівання камери печі при горінні природного газу

Тривалість випалювання 480 годин при надлишку повітря $a = 1,1$. Початкова температура, природного газу, заготовок, пересипки та інших складових печі - 300 К. Початкова температура повітря 500 К. Вміст у природному газі CH_4 та кисню у повітрі, розрідження на виході з камери прийнято печі такі ж, як і у попередніх дослідженнях.

У порівнянні з попередніми дослідженнями максимальна температура по всьому об'ємі камери значно вища, що підтверджує результати розрахунків зміни температури горіння у залежності від температури підігрітого повітря.

Як і в попередніх дослідженнях спостерігається наявність холодної області печі (рис 2.41) Прогрів камери у порівнянні з попередніми дослідженнями краще, що обумовлене значно більшим підводом теплоти.

Холодна зона біля вогневого колодязя набагато тепліша у порівнянні з попередніми дослідженнями. Це пояснюється тим, що повітря вже підводить з собою акумульоване тепло.

Найвищою є температура стінок вогневого колодязя (близько 2254 К), мінімальною є температура протилежної стінки (близько 2063 К). Перепад температури по всьому об'ємі камери печі сягає 191 К.

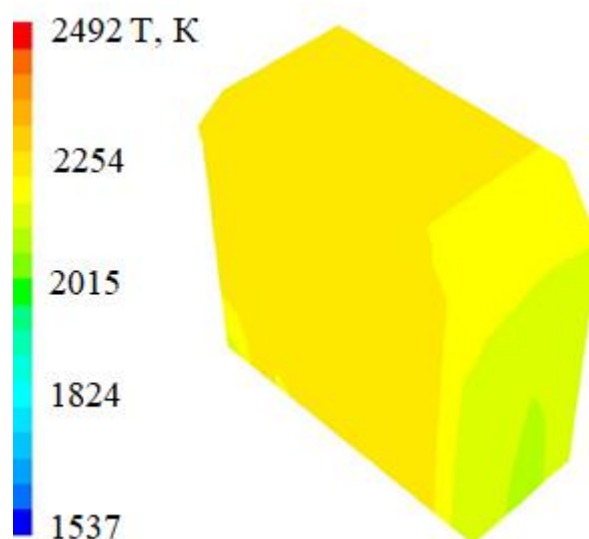


Рисунок 2.41 Температурне поле камери печі на кінець кампанії випалювання при розрідженні 50 Па при температурі повітря 500 К та надлишку $a = 1,1$

З наведених на рис 2.42 температурного поля та його порівнянням з попередніми дослідженнями можна зробити висновок, що максимальна температура для даного дослідження значно вище, ніж у попередніх. Проте воно менш однорідне. Спостерігається значний вплив холодної області печі на температури поля. Отримані результати пояснюються збільшенням температури теплоносія.

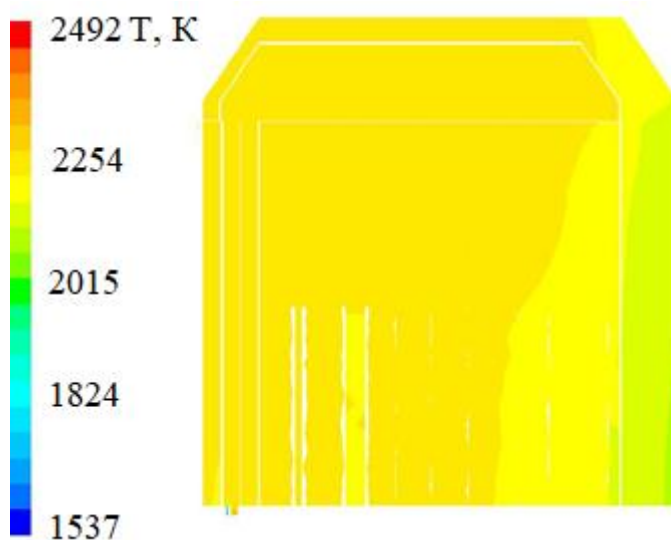


Рисунок 2.42 Температурне поле при зрізі на половині камери печі при розрідженні 50 Па при температурі повітря 500 К та надлишку $a = 1,1$

На рис 2.43 наведено температурне поле пересипки. Проглядається значний вплив холодної зони печі. Максимальне значення температури – 2254 К, мінімальне – 2110 К. Перепад температур складає 144 К.

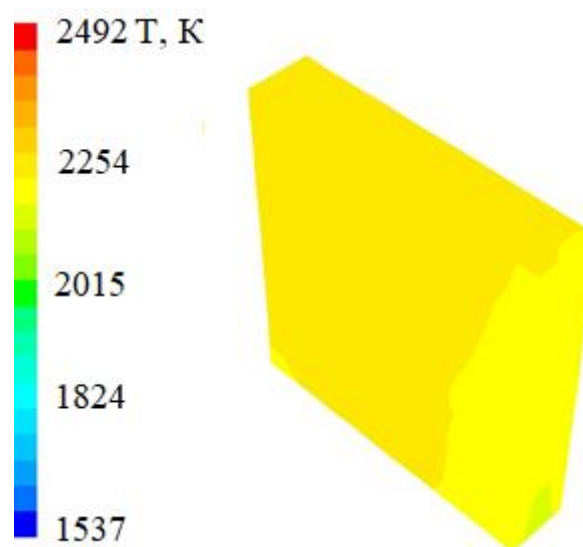


Рисунок 2.43 Температурне поле пересипки при розрідженні 50 Па при температурі повітря 500 К та надлишку $a = 1,1$

В результаті повного прогріву камери печі присутній значний перепад температур по всьому об'ємові заготовок (рис. 2.44). Температура заготовок приймає значення 2206-2015 К. Відповідно перепад температур складає 191 К.

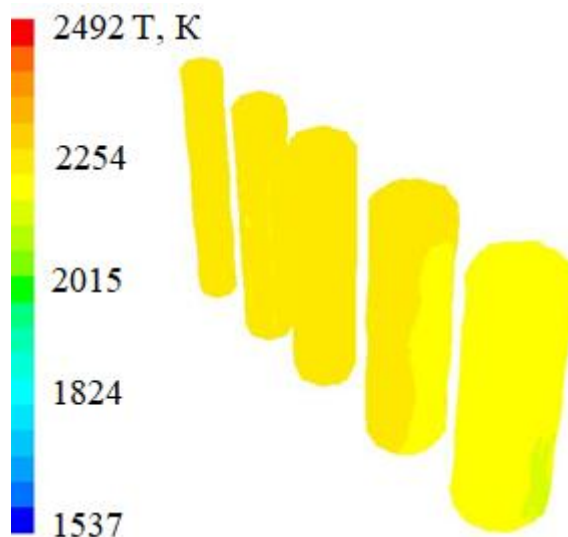


Рисунок 2.44. Температурні поля заготовок при розрідженні 50 Па при температурі повітря 500 К та надлишку $a = 1,1$

Графіки графіки швидкості росту мінімальної та максимальної температури по газовому середовищі камери печі представлені на рис 2.45.

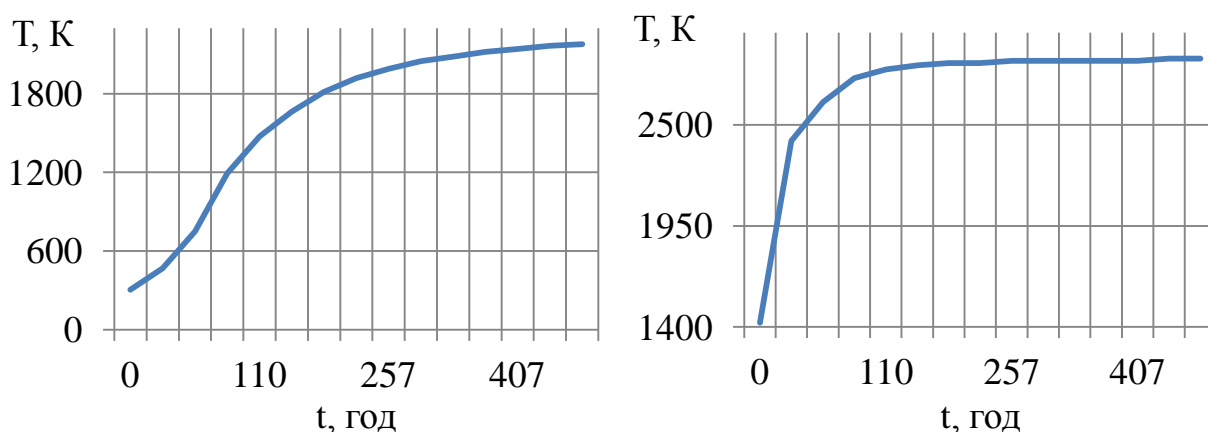


Рисунок 2.45 Графіки швидкості росту мінімальної та максимальної температури по газовому середовищі камери

У роботах [16-17] наводяться графіки швидкості росту мінімальної та максимальної температур у заготовках протягом всього процесу нагрівання камери печі.

Як і у попередньому дослідженні видно, що мінімальна та максимальна температура стрімко змінюються, проте в діапазоні 10-100 годин. Цілком логічно, оскільки для прогріву стінок футеровки на більші температури, що в свою чергу буде догрівати природній газ та повітря, потрібно більше часу.

У матеріалах [18-21] додатково наведено результати аналізу впливу способу завантаження заготовок на температурні поля печі випалювання на етапі камера «під вогнем» та аналіз впливу витрати природнього газу на температурні поля печі випалювання вуглецевих виробів.

Висновки до розділу 2

1. В результаті дослідження теплових режимів камери випалювання на протязі трьох стадій процесу – охолодження, нагрівання димовими газами та камера «під вогнем» визначені фактори, що найбільше впливають на тепловий режим процесу випалювання вуглецевих заготовок: витрата палива, надлишок витрати повітря, початкова температура повітря та величина розрідження.

2. Результати проведеного дослідження засвідчили, що доцільним є зменшення подачі повітря на етапі камера «під вогнем», що забезпечує повне спалювання палива.

3. При зміні подачі надлишку повітря виявлена залежність зміни максимальних та мінімальних температур у камері печі, а саме при збільшенні надлишку повітря температури зменшуються. Проте при збільшенні надлишку повітря збільшується тиск у камері печі а тому і швидкість руху димових газів. Це, у свою чергу, призводить до більшої однорідності температурного поля по пересипці та заготовкам відповідно.

4. Навіть незначне збільшення початкової температури повітря на етапі камера «під вогнем», що йде на спалювання, має суттєвий вплив на збільшення температури по всьому об'ємові печі, а відповідно, і до збільшення максимального перепаду температур.

5. За характеристиками температурних полів весь об'єм касети печі можна умовно поділити на 3 зони: холодну, гарячу та підсклепінчасту. Охолодження проходить інтенсивніше ближче до «холодної зони» та повільніше біля «гарячої зони» печі, що в першу чергу і обумовлює перепад температур по горизонталі. Наявність «підсклепінчатої зони» печі та нагрівання повітря при проходженні газових трактів обумовлює перепад температур по вертикалі. Очевидний значний вплив зони 4 на температуру заготовки № 4. Досліджено вплив четвертої зони печі на температурні поля камери в залежності від надлишку повітря. Виявлено, що зі збільшенням надлишку повітря вплив зони збільшується.

6. Збільшення витрати повітря на етапі охолодження виникає збільшення перепаду температур по всьому об'єму касети печі та заготовках відповідно.

7. Зменшення надлишку повітря призводить до зменшення середнього значення перепаду температур на перших двох етапах нагрівання димовими газами, проте призводить до збільшення перепаду на інших етапах.

8. Прослідковується тенденція до зменшення температур від першої до п'ятої заготовки, проте значення температур четвертої заготовки вище, ніж третьої та п'ятої, що пояснюється значним впливом четвертої зони печі на процес нагрівання.

9. Підведення розрідження до камери печі на етапі нагрівання димовими газами призводить до збільшення однорідності температур по всьому об'ємі камери. Проте при значних значеннях розрідження зростає швидкість димових газів, що, у свою чергу, призводить до температури вихідних димових газів, що є позитивним фактором з точки зору їх використання у наступній камері підігрівання та одночасно зниження температури по об'єму даної камери, що очевидно є негативним фактором.

Список використаних джерел до розділу 2

1. Сошкин Г. С. Исследование процесса обжига электродной продукции в многокамерных печах и разработка системы оптимального управления Владикавказ 2012.
2. Лутков А. И. Тепловые и электрические свойства углеродных материалов — М. : Metallurgia, 1990. — 175 с.
3. Угольные и графитовые электроды для электропечей и электролизеров / (Систематическое собрание патентов, сост. М. Б. Шварцберг). — Л.-М., 1938.
4. Левченко П. В. Расчет печей и сушил силикатной промышленности Москва, Высшая школа, 1968. - 363 с
5. Жученко О. А. Дослідження процесу охолодження в багатоканальних печах випалювання / О.А. Жученко, А.П. Коротинський // «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки». Праці VI-ї Міжнародної науковопрактичної конференції. Чернівці: Видавничий дім «Родовід», 2017.— 177с.. 5-8 жовтня 2017р.
6. Жученко О. А. Дослідження процесу охолодження у багатоканальних печах випалювання вуглецевих виробів / Жученко О. А., Коротинський А. П. // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки том 29 (68) часть 1 — 2018. (включено до наукометричної бази даних Index Copernicus). (досліджено температури вуглецевих заготовок, пересипки та газового середовища при різному надлишку повітря).
7. Жученко О. А. Дослідження впливу надлишку повітря на процес нагрівання багатоканальної печі випалювання димовими газами / О. А. Жученко, А. П. Коротинський // Енергетика: економіка, технології, екологія. - 2018. - № 1. - С. 71-80. (досліджено вплив надлишку витрати повітря на температурні поля процесу випалювання на стадії нагрівання димовими газами).
8. Жученко О. А. Аналіз впливу надлишку повітря на температурні поля процесу випалювання вуглецевих виробів / О.А. Жученко, А.П. Коротинський //

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2018 [текст]: Матеріали П'ятої Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ-2017), Київ, 11-12 квітня 2018р. КПІ ім. Ігоря Сікорського, Політехніка.-168 с. С. 77-79

9. Жученко О. А. Дослідження впливу надлишку повітря на процес нагрівання камери печі випалювання димовими газами / Жученко О. А., Коротинський А. П. // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології [Текст]: Тези доповідей XI-ї науково-практичної конференції студентів. Київ, 06–07 грудня 2017 р. [Електронний ресурс] – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 91 с. С 65-66.

10. Жученко О. А. Дослідження впливу розрідження на процес нагріву багатокамерної печі випалювання димовими газами / О. А. Жученко, А. П. Коротинський // Наукоємні технології. - 2018. - № 2. - С. 255-264. (досліджено вплив розрідження на температурні поля процесу випалювання на стадії нагрівання димовими газами).

11. Жученко О. А. Аналіз впливу розрідження на процес нагріву багатокамерної печі випалювання / Жученко О. А., Коротинський А. П., Катишев Є. В. // Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації [текст]: Тези доповідей 8-ї Міжнародної наукової конференції, присвяченої 100-річчю Національної академії наук України та 100-річчю Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка «Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації». — Кам'янець-Подільський : Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 2018. — 160 с. С.-26

12. Жученко О. А. Дослідження впливу розрідження на температурний режим процесу випалювання вуглецевих виробів на етапі камера «під вогнем» / О.А. Жученко, А.П. Коротинський // Вісник Криворізького національного університету. Збірник наукових праць. – 2018. - №47. – С. 44-49. (включено до наукометричної бази даних Index Copernicus). (досліджено вплив розрідження на температурний розподіл процесу випалювання).

13. Жученко О. А. Дослідження впливу розрідження на етапі камера «під вогнем» процесу випалювання вуглецевих виробів / Жученко О. А., Коротинський А. П. // Автоматизоване управління багатовимірними об'єктами на засадах обчислювального інтелекту [текст]: Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «автоматизоване управління багатовимірними об'єктами на засадах обчислювального інтелекту» 17 - 19 жовтня 2018 року Івано-Франківськ – 2018 — 251 с. С.36-38

14. Жученко О. А. Аналіз впливу надлишку повітря на температурні поля процесу випалювання вуглецевих виробів / Жученко О. А., Коротинський А. П. // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2018 [текст]: Матеріали V Міжнар. наук.-практ конф. Молодих учених, аспірантів і студ. (АКІТ – 2018), м. Київ, 11-12 квіт. 2018р. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2018. – 168 с. С. 77-78.

15. Жученко О. А. Дослідження впливу надлишку повітря на процес випалювання вуглецевих виробів у камері "під вогнем" / О. А. Жученко, А. П. Коротинський // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки. - 2018. - № 1. - С. 119-128. (досліджено вплив надлишку витрати повітря на температурні поля процесу випалювання)

16. Жученко О. А. Дослідження впливу початкової температури повітря на температурний режим процесу випалювання вуглецевих виробів у камері "під вогнем" / О. А. Жученко, А. П. Коротинський // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія : Технічні науки. - 2018. - Вип. 36. - С. 201-209. (досліджено вплив початкової температури повітря на температурні поля процесу випалювання на стадії "камера під вогнем").

17. Жученко О. А. Дослідження впливу початкової температури повітря на температурний режим камери «під вогнем» / Жученко О. А., Коротинський А. П., Катишев Є. В. // Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта) [текст]: Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції присвяченої 120-річчю НУБіП України «Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі

природокористування» (теорія, практика, історія, освіта) м. Київ, 23-27 травня 2018 р. НУБіП 2018 — 131 с. С.51-53

18. Жученко, О. А. Аналіз впливу способу завантаження заготовок на температурні поля печі випалювання на етапі камера «під вогнем» / Жученко О. А., Коротинський А. П. // Інформаційні технології і автоматизація – 2018 : зб. доп. XI Міжнар. наук.-практ. конф., Одеса, 4–5 жовт. 2018 р. / Одес. нац. акад. харч. технологій ; ред. кол.: С. В. Котлик, В. А. Хобін. – Одеса, 2018. – Ч. I. – С. 43–44 : рис. – Бібліогр.: 2 назв.

19. Жученко О. А. Дослідження впливу витрати природнього газу на температурні поля печі випалювання вуглецевих виробів / О.А. Жученко, А.П. Коротинський// Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології [текст]: Матеріали Шостої Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ-2019), Київ, 23-24 квітня 2019р. – КПІ ім. Ігоря Сікорського, «Політехніка». С. 127-128.

20. Жученко О. А. Дослідження впливу витрати палива на температурні поля печі випалювання вуглецевих виробів / О.А. Жученко, А.П. Коротинський // Збірник наукових праць національного університету кораблебудування імені Адмірала Макарова Наукове видання №4 (478) 2019, С. 3-10.

21. Жученко О.А., Коротинський А.П., Хібеба М.Г. Математичне моделювання енергоємних технологічних процесів вуглеграфітового виробництва [текст] : монографія. –К.:КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 344 с.:іл. – 300 прим. ISBN 978-617-7503-56-8.

РОЗДІЛ 3 СПРОЩЕНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ВИПАЛЮВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ ТА ЇЇ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1. Обґрунтування потреби у розробленні спрощених математичних моделей

Процес випалювання вуглецевих виробів у багатокамерній печі характеризується складними фізико-хімічними процесами, що протікають під час кампанії, та суттєвою просторовою розподіленістю температур по всьому об'ємові печі. Тому такі процеси математично описуються доволі складними нестационарними рівняннями у частинних похідних.

Час обрахунку згаданих вище моделей складає від декількох годин до декількох десятків годин, що значно сповільнює дослідження процесу випалювання та робить неможливим використання такої математичної моделі у системах керування реального часу.

На сьогоднішній день існує значна кількість методів спрощення математичних моделей об'єктів [1-7].

У роботі [8] описаний метод зменшення розмірності, що називається дискретною емпіричною інтерполяцією, що являє собою модифікацію методу ортогонального розкладання. Авторами пропонується дискретний метод емпіричної інтерполяції, варіант, який підходить для зменшення розмірності систем звичайних диференціальних рівнянь певного типу.

Авторами [9] наведено нову модель спрощення на основі правильного ортогонального розкладання для розв'язання рівнянь Наве-Стокса, що являє собою гібрид двох існуючих підходів, а саме методу квадратичного розкладання та методу дискретної емпіричної інтерполяції.

У роботі [10] описано метод, що поєднує в собі ортогональне розкладання та поняття з збалансованої теорії реалізації. Метод особливо ефективний при невеликій кількості результатів, що представляють інтерес.

Автором роботи [11] представлені основні ідеї, поняття та методи спрощення кінетики реакцій моделей: квазістаціонарні, квазірівноважні, повільні інваріантні різноманіття та граничні ступені.

У роботі [12] проведене порівняльне дослідження семи алгоритмів для спрощення моделі та зроблені висновки щодо найбільш ефективного з них при застосованні до шести різних динамічних систем.

Згідно з класифікацією [13] методи спрощення математичних моделей об'єктів з розподіленими параметрами умовно поділяються на дві основні групи згідно «предмету апроксимації». Перша група характеризується різними способами спрощеного представлення самих вихідних диференціальних рівнянь об'єкта, подальше розв'язання яких відомими методами дозволяє отримати задовільні по точності опису властивостей об'єктів з розподіленими параметрами. Методам цієї групи характерна втрата властивостей, які визначаються просторовою розподіленістю керованих процесів, а тому суперечать вимогам, що поставлені до математичної моделі процесу випалювання. Методи другої групи базуються на наближеному поданні точних розв'язків рівнянь у часткових похідних, що моделюють поведінку об'єктів з розподіленими параметрами.

З аналізу літературних даних слідує, що для вирішення поставленої задачі найкраще підходить метод ортогонального розкладання, який є методом другої групи та задовольняє всім поставленим умовам.

Саме тому у даній роботі побудова та дослідження спрощеної математичної моделі процесу випалювання вуглецевих виробів здійснюється на основі методу ортогонального розкладання, яка б потребувала короткого часу розрахунку та відповідала вимогам щодо її точності по відношенню до початкової складної математичної моделі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- визначити базисні вектори та коефіцієнти Фур'є;
- обрати оптимальну конфігурацію ідентифікаційних моделей;
- дослідити точність та адекватність отриманої спрощеної математичної моделі.

3.2. Матеріали і методи спрощення математичної моделі процесу випалювання вуглецевих виробів

3.2.1. Методика спрощення математичної моделі методом Фур'є

Спрощення математичної моделі процесу випалювання вуглецевих виробів вимагає отримання доволі точних результатів моделювання не тільки протягом всього часу моделювання, а і по всьому об'ємові апарату, що задовольняється методом розділення змінних (метод Фур'є).

Враховуючи що, метод Фур'є - метод ортогонального розкладання, та являє собою метод другої групи то для його реалізації необхідно сформувати зразки температурних полів за початковою складною математичною моделлю.

Процес випалювання вуглецевих виробів складається з трьох основних етапів, таких як підігрівання димовими газами, камера “під вогнем” та охолодження, то для адекватного моделювання такого процесу та отримання відповідних температурних полів було реалізовано три повні математичні моделі даних етапів на основі математичної моделі, наведеної у роботі [14]. Відповідно до цього спрощена математична модель процесу випалювання буде включати у себе три спрощені моделі основних етапів процесу.

Математична реалізація даного методу описана у роботі [15] та описує представлення наближених значень результатів моделювання обмеженим рядом

$$\hat{T}(\xi, t) = \sum_{i=1}^n a_i(t) \varphi_i(\xi), \quad (1)$$

де φ_i - базисні вектори, a_i - значення коефіцієнтів Фур'є.

Відповідно до вище сказаного, алгоритм спрощення моделі включає:

1. Формування зразків температурних полів за початковою складною математичною моделлю;
2. Визначення ряду базисних векторів на основі сформованих зразків температурних полів;

3. Вибір структури моделі, що описує залежності між $u(t)$ та $\{a_i(t)\}_{i=1}^n$.

3.2.2 Методика оцінювання якості апроксимації.

Для оцінки якості апроксимації було обраховано похибку для випадків використання $n = 1..30$ перших базис-векторів.

$$e_A = \frac{\sum_{\xi=1}^L \sum_{t=0}^K (T_{snap}(\xi, t) - T_A(\xi, t))^2}{KL}, \quad (2)$$

де $T_A = \Phi_n A_n$ – матриця апроксимованих температур, Φ_n, A_n – перші n базис-векторів та коефіцієнтів Фур'є відповідно. Для заданої максимально допустимої похибки $e_{\max} = 0,1$ використання в подальших дослідженнях більш ніж 15 базис-векторів виявилось недоцільним, оскільки така кількість вже забезпечила умову $e_A < e_{\max}$. Приймаємо $n_{\max} = 15$.

3.3. Спрощені математичні моделі процесу випалювання

3.3.1 Формування оптимальної структури спрощених моделей

В результаті розкладу за сингулярними числами були отримані значення базис векторів φ_i , частина з яких представлена у табл. 3.1-3.3. Далі за допомогою формули (1) визначені значення коефіцієнтів Фур'є (табл. 4-6). Результати розрахунків наведені лише частково тому, що L (кількість точок (вузлів), в яких моделюється температура) складає тисячі (в даному випадку розрахункова сітка складає 18644 вузли), а кількість кроків по часу K – сотні (для даного спрощення 480 годин).

Таблиця 3.1. Значення базис-векторів для створення спрощеної моделі охолодження камери печі повітрям

$i \backslash$	1	2	3	...	K

$\xi \backslash i$					
1	-0,00881275	0,00109225	0,00362483	...	0,001615686426
2	-0,00909725	0,001877298	0,00581828	...	-0,002641292723
3	-0,00873969	0,001036539	0,00318769	...	-0,013192636318
4	-0,00924921	0,000946707	0,0072734	...	-0,000312211223
5	-0,00926741	0,001181525	0,0074772	...	0,003119028133
...
L	-0,00918001	0,001083891	0,00643872	...	0,00991501328390

Таблиця 3.2. Значення базис-векторів для створення спрощеної моделі нагрівання камери печі димовими газами

$i \backslash \xi$	1	2	3	...	K
1	-0,00651927	-0,00345675	-0,0065497	...	-0,00042032235265
2	-0,00631024	-0,00386776	-0,0079724	...	-0,001121240848478
3	-0,00657570	-0,00326930	-0,0061790	...	0,003174325474985
4	-0,00618794	-0,00330912	-0,0091424	...	-4,39514395905e-05
5	-0,00614540	-0,00315756	-0,0095306	...	-0,00019734264029
...
L	-0,00614641	-0,00311091	-0,0095918	...	-0,000567698956155

Таблиця 3.3. Значення базис-векторів для створення спрощеної моделі нагрівання камери печі при горінні природного газу

$i \backslash \xi$	1	2	3	...	K
1	-0,00777750	-0,00538909	0,00038946	...	0,00271268452697

2	-0,00775877	-0,00707303	0,00259699	...	-0,007262256218404
3	-0,00778102	-0,00502355	2,9184e-05	...	0,00929180972554
4	-0,00775588	-0,00750436	0,00452306	...	-0,001962873255037
5	-0,00775142	-0,00773580	0,00500481	...	0,0006750066028036
...
L	-0,00774061	-0,00737207	0,00290409	...	-0,00226721050656

Таблиця 3.4. Значення коефіцієнтів $a_i(t)$ для створення спрощеної моделі
охолодження камери печі повітрям

$t \backslash$	1	2	3	4	...	K
1	-159666,60	-159741,40	-159543,86	-158640,12	...	-108392,34
2	-14149	-14377,628	-13985,091	-12074,4	...	-5453,0216
3	-25812,031	-25847,576	-25642,069	-24771,8	...	-300,85632
4	-5593,8867	-5600,4843	-5419,6085	-4777,508	...	1995,88646
...
K	-2,891e-05	-0,0185042	-0,0047972	-0,0043852	...	3,00532e-05

Таблиця 3.5. Значення коефіцієнтів $a_i(t)$ для створення спрощеної моделі
нагрівання камери печі димовими газами

$t \backslash$	1	2	3	4	...	K
1	-34584,8	-33644,597	-33926,856	-34431,05	...	-56711,148
2	-1083,7427	-2173,7684	-1816,5613	-1319,9563	...	519,31363
3	-6285,0128	-6595,2336	-6514,4854	-6317,149	...	1262,46
4	-3151,31	-3556,79	-3440,4324	-3122,141	...	-630,822
...
K	0,00021720	5,4489e-05	0,00022263	-0,0002076	...	-0,0023041

Таблиця 3.6. Значення коефіцієнтів $a_i(t)$ для створення спрощеної моделі нагрівання камери печі при горінні природного газу

$t \backslash$	1	2	3	4	...	K
1	-162630,44	-162990,99	-162429,38	-161755,36	...	-172434,36
2	-1819,8016	-1254,3905	-2075,8492	-3058,9365	...	5542,23760
3	-312,56606	-17,745882	-454,97879	-962,09776	...	-1434,4278
4	322,015976	188,584054	128,332304	263,336444	...	-479,77911
...
K	0,00022711	0,00749919	-0,0045488	0,00050447	...	0,000213122

3.3.2 Ідентифікація залежностей між коефіцієнтами Фур'є та вхідними сигналами

У результаті ідентифікації для кожного з $n = 1..15$ було знайдено такі моделі, що найточніше описують зв'язок між значеннями коефіцієнтів $a_i(t)$ та вхідними сигналами моделі $u(t)$. У всіх випадках найкраще з поставленою задачею впоралися ARX-моделі авторегресії зі структурою типу:

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_{na} y(t-na) = b_1 u(t-nk) + \dots + b_{nb} u(t-nb-nk+1) + e(t).$$

У таблицях 3.7-3.9 містяться дані про конфігурацію оптимальних ідентифікаційних моделей для кожного з n та їх точність.

Таблиця 3.7. Дані про оптимальні структури ідентифікаційних моделей охолодження камери печі повітрям

n	na	nb	nk
1	1	5	5
2	1	2	2
3	1	5	5
4	1	2	3

5	1	2	3
6	1	2	3
7	1	1	4
8	1	1	4
9	1	1	4
10	1	1	4
11	1	2	4
12	1	1	4
13	1	1	4
14	1	1	4
15	1	1	4

Таблиця 3.8. Дані про оптимальні структури ідентифікаційних моделей
нагрівання камери печі димовими газами

n	na	nb	nk
1	1	2	2
2	1	2	2
3	1	1	2
4	1	3	2
5	1	1	1
6	1	1	1
7	1	1	1
8	1	1	1
9	1	1	2
10	1	1	2
11	1	1	2
12	1	1	2
13	1	1	2
14	1	1	2

15	1	1	2
----	---	---	---

Таблиця 3.9. Дані про оптимальні структури ідентифікаційних моделей нагрівання камери печі при горінні природного газу

n	na	nb	nk
1	1	4	5
2	1	1	1
3	1	4	5
4	1	1	1
5	1	1	1
6	1	1	1
7	1	1	1
8	1	1	1
9	1	1	2
10	1	1	4
11	1	1	1
12	1	1	1
13	1	1	1
14	1	1	1
15	1	1	1

3.4. Дослідження якості спрощених моделей

Похибки роботи отриманих моделей обраховувались за допомогою формули (2), в якій T_A замінено на T_M – матрицю змодельованих спрощеними моделями температур.

Модель з $n = 1$ очікувано показала найгірші результати, що спричинено низькою якістю апроксимації температурних знімків лише одним базис-вектором, проте при їх збільшенні точність значно зростає (табл. 3.10.).

Таблиця 3.10. Квадрат похибки відтворення температурних знімків

№ структури/етап	Охолодження	Нагрівання димовими газами	Камера «під вогнем»
1	4474,82265765	1063,3982465	1295,7262703
2	2318,82575130	681,73729622	737,57468543
3	256,816261076	724,74649292	36,145530539
4	123,94032455	335,18327552	146,30939708
5	101,34883148	309,27127258	109,51076554
6	98,015308988	291,40143175	68,809944111
7	103,34683314	290,69538448	79,505159875
8	93,850797632	221,31068331	63,681677027
9	72,858692183	200,50024623	71,950127685
10	72,567943544	190,83444156	52,850688386
11	38,189108850	183,77816952	55,789743076
12	55,176655556	169,05799027	57,942293222
13	30,441986682	177,41770938	56,8910246698
14	30,426011949	145,93273566	60,7601747592
15	21,879654817	144,70491576	24,017044386

Отже, в результаті розрахунку похибки спрощених моделей було виявлено, що найбільш точними для всіх етапів є спрощені моделі, що використовують 15 перших базис-векторів ($n = 15$). Очевидно, що при збільшенні кількості базис-векторів можливо досягти кращого результату відтворення температурних знімків, проте це призведе до збільшення часу розрахунку, що є недоцільним.

Оскільки в результаті моделювання спрощених моделей отримано динаміку температури в усьому об'ємі, то для графічного представлення результатів доцільно зображувати температури лише у деяких контрольних точках.

Враховуючи, що у процесі випалювання вуглецевих виробів визначальними температурами є температури заготовок, то для дослідження якості спрощених моделей були обрані контрольні точки заготовок. Розташування контрольних точок наступне (див рис 3.1.):

- по осях заготовок на відстані 100 мм від верхнього (т. 2,6,10,14,18) і нижнього (т. 4,8,12,16,20) торців відповідно;

- по периферії заготовок нижнього ряду: на відстані 100 мм від верхнього (т. 1,3,5,7,9,11,13,15,17,19).

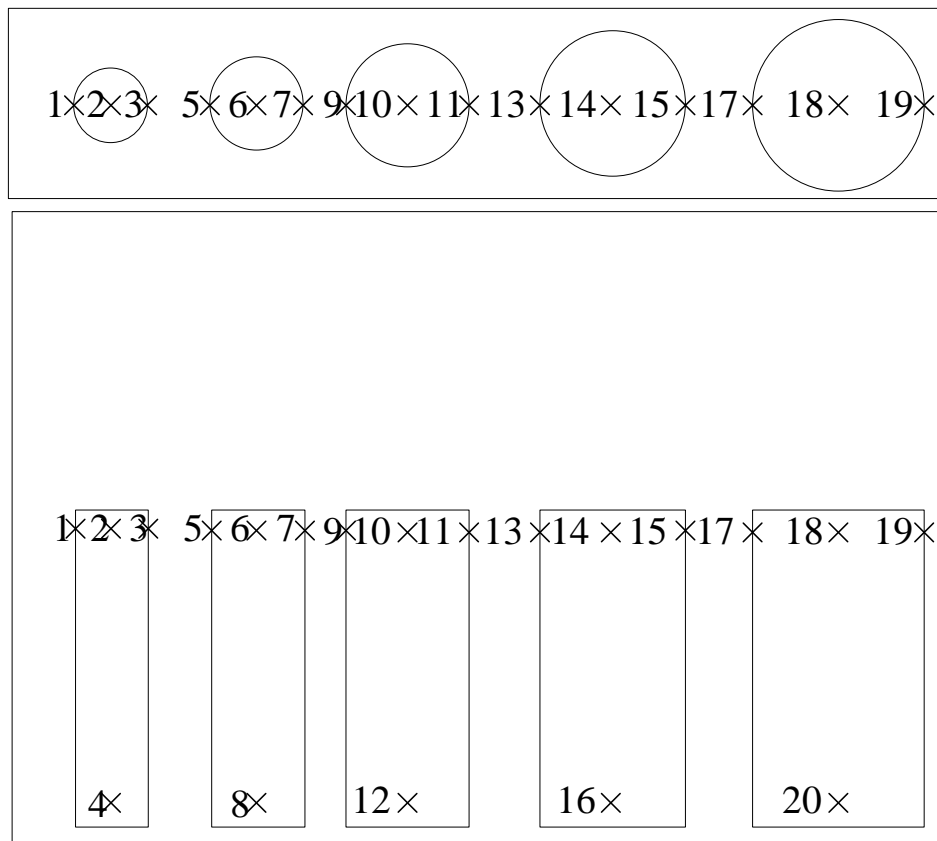


Рисунок 3.1. Схема розміщення контрольних точок при імітаційному моделюванні кампанії випалювання

З урахуванням обмежень на обсяг роботи у подальшому представлені результати імітаційного моделювання тільки для 4-х контрольних точок.

Як видно з рис. 3.2-3.4, графіки зміни температур, розраховані за спрощеною та повною математичними моделями, практично співпадають для всіх контрольних точок в усіх режимах роботи (охолодження, нагрівання димовими газами, камера під вогнем). Середня похибка моделювання складає: для режиму охолодження - 4,6 К (що у діапазоні моделювання відповідає 1,4 %), для режиму нагрівання димовими газами - 12 К (що в даному діапазоні нагрівання складає 10 % та при збільшенні діапазону нагрівання буде змешуватись).

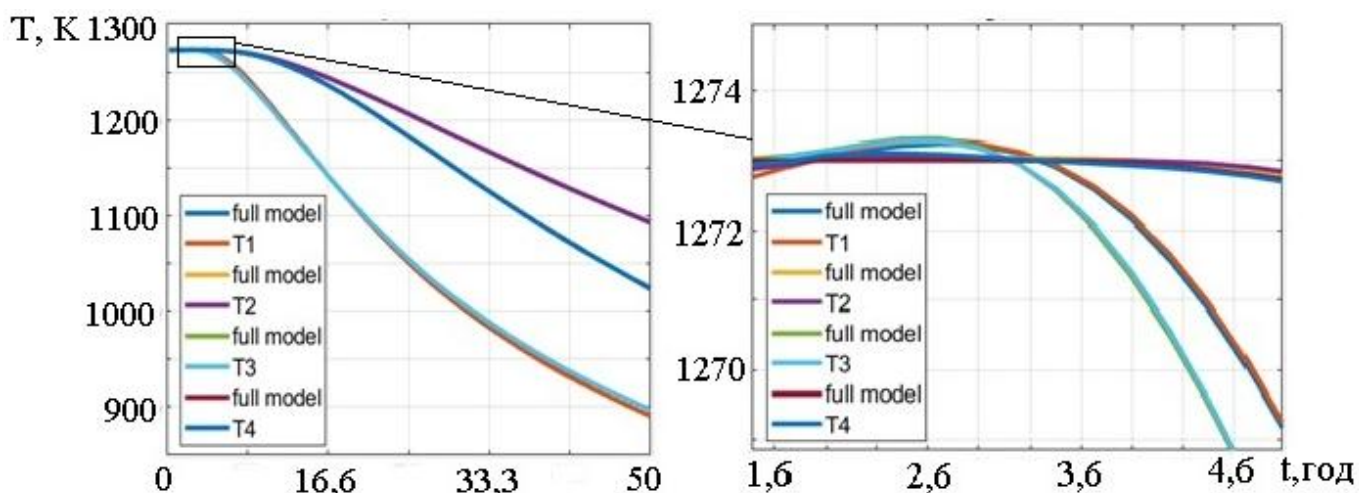


Рисунок 3.2. Графіки зміни температур в контрольних точках спрощеної та повної моделей охолодження

зменшуватись), для режиму камера під вогнем - 4,8 K. Особливу увагу привертає до себе робота спрощеної моделі у режимі камера під вогнем (рис. 3.4). Незважаючи на досить складну динаміку температур у даному режимі, спрощена математична модель достатньо точно відслідковує всі поточні зміни.

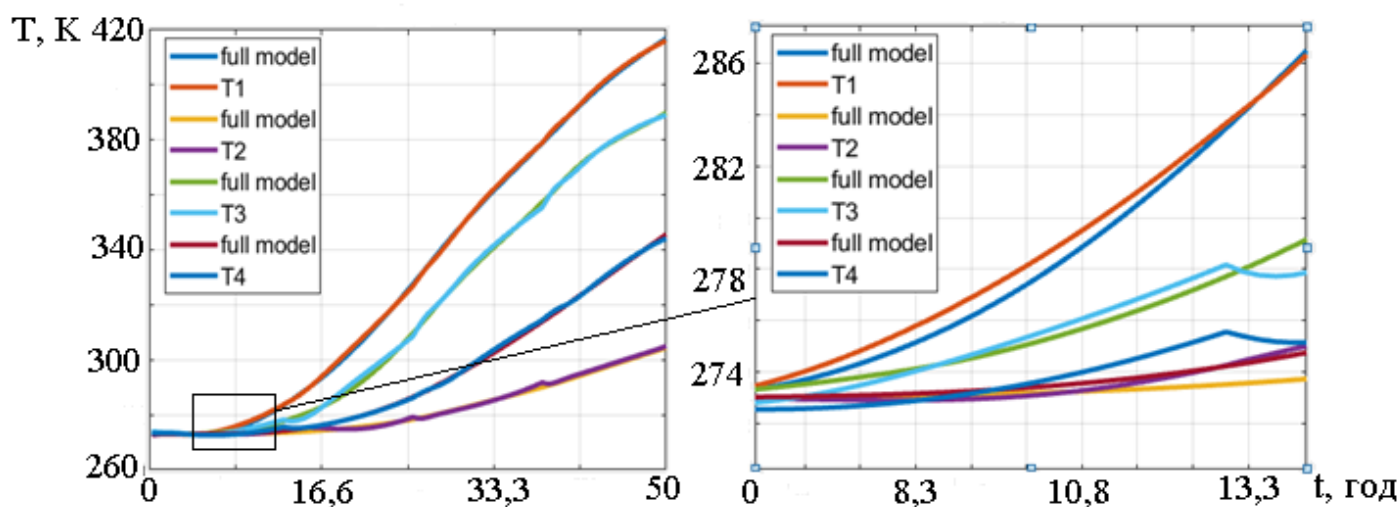


Рисунок 3.3. Графіки зміни температур в контрольних точках спрощеної та повної моделей нагрівання димовими газами.

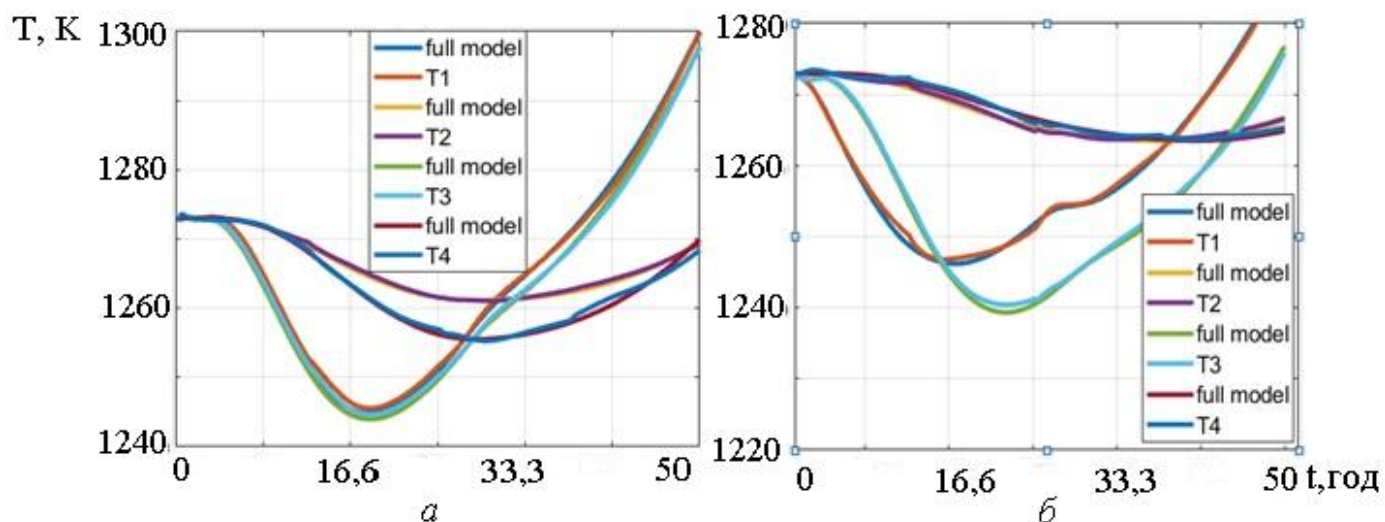


Рисунок 3.4. Графіки зміни температур в контрольних точках спрощеної та повної моделей камери "під вогнем": а - заготовка №1; б - заготовка №2.

Дослідження якості розроблених спрощених математичних моделей [16-17] включало у себе дослідження їх точності та адекватності для кожної обраної контрольної точки та для кожного режиму роботи камери випалювання.

Точність математичних моделей оцінювалась за трьома видами похибки – абсолютною, відносною та нормованою абсолютною. Результати дослідження точності для всіх режимів роботи представлені у табл.3.11-3.13.

Таблиця 3.11. Результати дослідження точності моделі нагрівання димовими газами

Міра точності	Контрольні точки									
	№1	№3	№5	№7	№9	№13	№14	№15	№17	№19
Середня абсолютна похибка (°С)	9,55	11,2	11,25	9,7	9,77	8,42	10	10,42	8,55	10,47
Середня відносна похибка (%)	2,52	3,23	3,16	2,85	2,65	2,37	2,8	3,2	2,3	2,1
Середня нормована	0,81	0,95	0,95	0,82	0,83	0,71	0,85	0,88	0,72	0,89

абсолютна похибка (%)										
----------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Таблиця 3.12. Результати дослідження точності моделі камери «під вогнем»

Міра точності	Контрольні точки									
	№1	№3	№5	№7	№9	№13	№14	№15	№17	№19
Середня абсолютна похибка (°С)	13,1	10,1	11,9	10,2	10,5	8,3	8,3	9,6	10,1	9,5
Середня відносна похибка (%)	1,23	1,03	1,19	1,08	1,0	0,79	0,86	1,00	1,03	0,81
Середня нормована абсолютна похибка (%)	1,11	0,86	1,01	0,86	0,89	0,7	0,71	0,81	0,86	0,8

Таблиця 3.13. Результати дослідження точності моделі охолодження повітрям

Міра точності	Контрольні точки									
	№1	№3	№5	№7	№9	№13	№14	№15	№17	№19
Середня абсолютна похибка (°С)	9,55	11,2	11,25	9,7	9,77	8,42	10	10,42	8,55	10,47
Середня відносна похибка (%)	2,52	3,23	3,16	2,85	2,65	2,37	2,8	3,2	2,3	2,1
Середня нормована абсолютна	0,81	0,95	0,95	0,82	0,83	0,71	0,85	0,88	0,72	0,89

табличний										
Фішера розрахунковий	0,97	1,05	1,05	1,01	0,95	1,02	0,97	0,95	0,98	1
Фішера табличний	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

Таблиця 3.16. Результати дослідження адекватності моделі камери «під вогнем»

Критерій	Контрольні точки									
	№1	№3	№5	№7	№9	№13	№14	№15	№17	№19
Ст'юдента розрахунковий	10	9,59	9,54	8,58	8,70	9,29	9,82	9,83	8,94	12,9
Ст'юдента табличний	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
Фішера розрахунковий	1,31	1,19	1,05	0,83	0,84	0,83	1,19	1,06	1,02	0,91
Фішера табличний	2.32	2.32	2.32	2.32	2.32	2.32	2.32	2.32	2.32	2.32

Таблиця 3.17. Результати дослідження адекватності моделі охолодження повітрям

Критерій	Контрольні точки									
	№1	№3	№5	№7	№9	№13	№14	№15	№17	№19
Ст'юдента розрахунковий	4,78	4,66	4,68	4,64	4,62	4,67	4,54	4,56	4,57	4,89
Ст'юдента табличний	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
Фішера	0,97	1,05	1,05	1,01	0,95	1,02	0,97	0,95	0,98	1

розрахунковий										
Фішера табличний	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

На основі аналізу результатів дослідження, представлених у табл. 3.15-3.17, відсутні підстави відкинути гіпотезу про адекватність розглянутих моделей. Отже, дані математичні моделі адекватно відтворюють результати розрахунків за початковою складною математичною моделлю.

Висновки до розділу 3

1. У зв'язку з тим, що математичні моделі процесу випалювання вуглецевих виробів, які використовувались для дослідження теплових режимів процесу випалювання не можуть бути застосовані у системах керування реального часу, то було проведено обґрунтування необхідності спрощення даних математичних моделей.

2. На основі проведеного аналізу існуючих методів спрощення математичних моделей доведена доцільність використання методу розділення змінних Фур'є. За результати проведеного дослідження визначені оптимальні структури спрощених математичних моделей.

3. Розроблені спрощені моделі для трьох режимів роботи камери випалювання – охолодження, нагрівання димовими газами та «під вогнем». Виконано дослідження якості розроблених спрощених математичних моделей, результати якого свідчать про високу точність у відтворенні даних, отриманих за результатами розрахунків початкових математичних моделей. Для оцінювання адекватності оперативних моделей відповідним повним моделям технологічних процесів вуглеграфітового виробництва обґрунтовано застосування статистичних критеріїв Стюдента та Фішера.

Список використаних джерел до розділу 3

1. Девятков Б. Н., Демиденко Н. Д. Теория и методы анализа управляемых распределенных процессов / Новосибирск: Наука, 1983. – 271 с.
2. Бутковский А. Г. Теория оптимального управления системы с распределенными параметрами / Москва: Наука, 1965. – 474 с.
3. Васильева А. Б. Асимптотические методы в теории сингулярных возмущений / Москва: Высшая школа, 1990. – 208 с.
4. Маковский В. А. Динамика металлургических объектов с распределенными параметрами / Москва: Металлургия, 1971. – 384 с.
5. Рей У. Методы управления технологическими процессами / Москва: Мир, 1983. – 368 с.
6. Чермак И., Петерка В., Заворка И. Динамика регулируемых систем в теплоэнергетике и химии / Москва: Мир, 1972. – 623 с.
7. Obinata G. , B.D.O. Anderson. Model Reduction for Control System Design. / Springer, London, 2001, P. 187.
8. Saifon C. Danny C. S. Nonlinear Model Reduction via Discrete Empirical Interpolation SIAM J. Sci. Comput., 32(5), P. 2737–2764.
9. Xiaoab D. Fanga F. Buchana A. G. Paina C. C. Navonc I. M. Dud J. Hub G. (2014) Non-linear model reduction for the Navier–Stokes equations using residual DEIM method Journal of Computational Physics Volume 263, 15 April 2014, Pages 1-18
10. Willcox K. Peraire J. "Balanced Model Reduction via the Proper Orthogonal Decomposition", AIAA Journal, Vol. 40, No. 11 (2002), pp. 2323-2330.
11. Gorban A. N. Model reduction in chemical dynamics: slow invariant manifolds, singular perturbations, thermodynamic estimates, and analysis of reaction graph Current Opinion in Chemical Engineering Volume 21, September 2018, Pages 48-59
12. Antoulas A.C., Sorensen D.C., Gugercin S. A survey of model reduction methods for large-scale systems

13. Рапопорт Э. Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами / Москва: Высшая школа, 2003. – 239 с.

14. Карвацький А. Я., Пулінець І. В., Шилович І. Л/ Математична модель тепло-гідродинамічного стану багатоканальної печі при випалюванні електродних заготовок / Восточно-Европейский журнал передовых технологий — 2012. — №1 (4) С. 33-37.

15. Жученко О. А. Метод спрощення математичних моделей об'єктів керування із розподіленими параметрами / Міжнародний науково-виробничий журнал «Автоматизація технологічних і бізнеспроцесів» Vol. 7, issue 1/2015. С. 15-25.

16. O. Zhuchenko. Development and investigation of the reduced mathematical model of the process of baking carbon products / O. Zhuchenko, A. Korotynskyi // Международный наукометрический научный журнал "СхідноЄвропейський журнал передових технологій". – 2019/ -№1/8(97). –С. 70-78.

17. Жученко О.А., Коротинський А.П., Хібеба М.Г. Математичне моделювання енергоємних технологічних процесів вуглеграфітового виробництва [текст] : монографія. –К.:КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 344 с.:іл. – 300 прим. ISBN 978-617-7503-56-8.

РОЗДІЛ 4 СИСТЕМА КЕРУВАННЯ З ПРОГНОЗУЮЧОЮ МОДЕЛЛЮ

4.1. Постановка задачі синтезу системи керування печею випалювання вуглецевих виробів з прогнозуючою моделлю

З аналізу існуючих систем керування [1-8] слідує, що для якісного управління процесом випалювання вуглецевих виробів необхідно використати підхід прогнозуючого керування. Для забезпечення заданого теплового режиму печі запропоновано застосовувати систему керування з прогнозуючою моделлю (СКПМ). Управління з прогнозуючими моделями особливо доцільно при управлінні системами з багатьма входами та виходами (МІМО-системи), що містять тісні взаємозв'язки та в яких потрібно враховувати численні обмеження. Проте процес випалювання не є класичним по відношенню до синтезу систем керування. Оскільки всі технологічні етапи фізично зв'язані між собою, це викликає складність при синтезі системи керування див рис. 4.1.

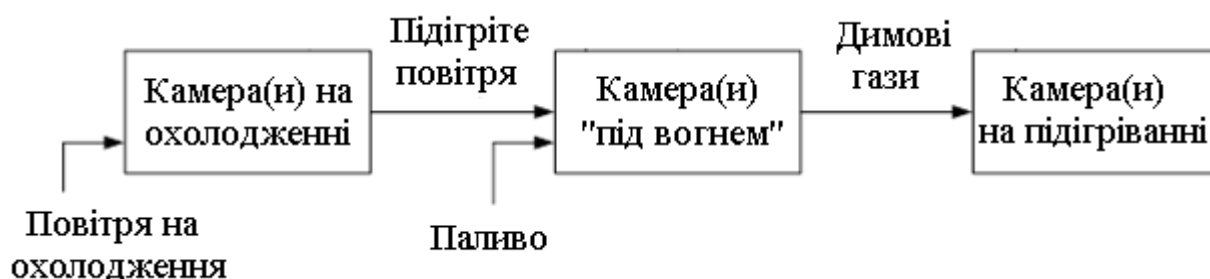


Рисунок 4.1. Схематичне зображення роботи печі випалювання

З опису роботи багатокамерної печі [9-10] відомо, що основним параметром процесу випалювання є температура по всій області печі. Температурні поля на різних етапах кампанії випалювання залежить від різних вторинних параметрів, що у свою чергу формуються від характеру ведення лише одного етапу, а саме камера «під вогнем». Звідси випливає, що система керування всією кампанією випалювання являю собою систему керування етапом камера «під вогнем», з врахуванням впливів від інших етапів.

Для етапу камери «під вогнем» керувальною змінною є витрата палива. З аналізу існуючих систем керування процесом відомо, що витрата повітря є

неконтрольованою величиною, оскільки його подача забезпечується тягою та підсосом з навколишнього середовища, а температура повітря в кожен момент часу залежить від проходження процесу охолодження, і також залежить від тяги повітря а відтак не є змінною, якою можна маніпулювати.

Враховуючи що, початкові температури для кожного з етапів функціонально залежать як від керувальної величини, так і від збурень, то вони не є сталими. Відтак, при розробленні системи керування початкові умови для камери «під вогнем» є динамічними, що для синтезу системи керування являє велику складність. Для вирішення даної задачі було обрано метод узагальнення експертних знань та відповідні початкові умови.

4.2. Синтез МРС-регулятора для процесу випалювання вуглецевих виробів

Як описано вище, математична модель випалювання вуглецевих виробів у багатокамерній печі випалювання складається з об'єднаних між собою трьох моделей основних етапів кампанії, а тому, і синтез регулятора повинен відбуватись з урахування зв'язків між «елементарними» моделями (див. рис. 4.2).

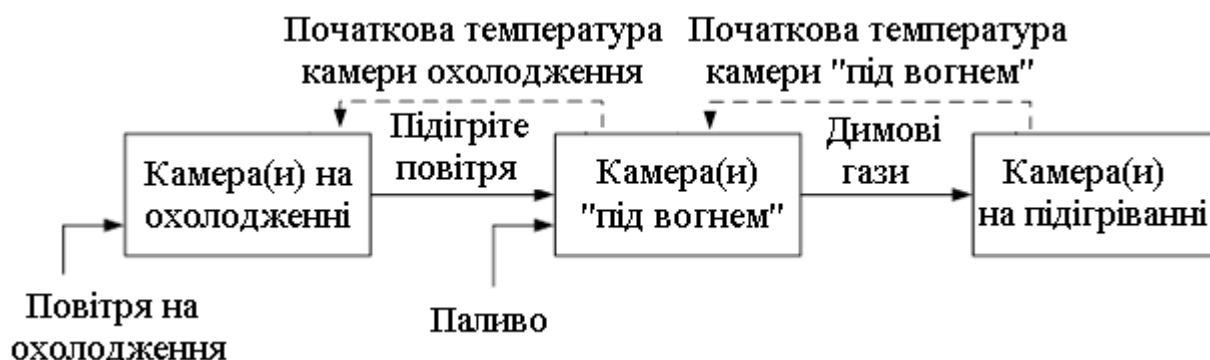


Рисунок 4.2. Схема об'єднання основних етапів кампанії випалювання вуглецевих виробів

Відповідно до сказаного реалізовано схему в програмному середовищі для моделювання Simulink, що представляє собою об'єднання чотирьох математичних моделей нагрівання камери печі димовими газами, однієї камери «під вогнем» та однієї камери на охолодженні з урахуванням зв'язків між ними (див. рис. 4.3).

Враховується, що витрата повітря задається в пропорції від витрати палива з урахуванням коефіцієнта надлишку повітря, температура повітря, що подається на горіння залежить від початкової температури камери охолодження, що являє собою кінцеву температуру камери «під вогнем» при переміщенні пальника на іншу камеру. Початкова температура камери «під вогнем» після переміщенні пальника на дану камеру складає кінцеву температуру найближчої до вогневої камери, що знаходиться на підігріванні димовими газами. Початкова температура камери після завантаження є температура навколишнього середовища. Початкова температура кожної наступної камери при нагріванні димовими газами є кінцева температура кожної попередньої камери. Температура димових газів, що подаються на кожну попередню камеру при нагріванні димовими газами є вихідна температура димових газів кожної наступної камери.

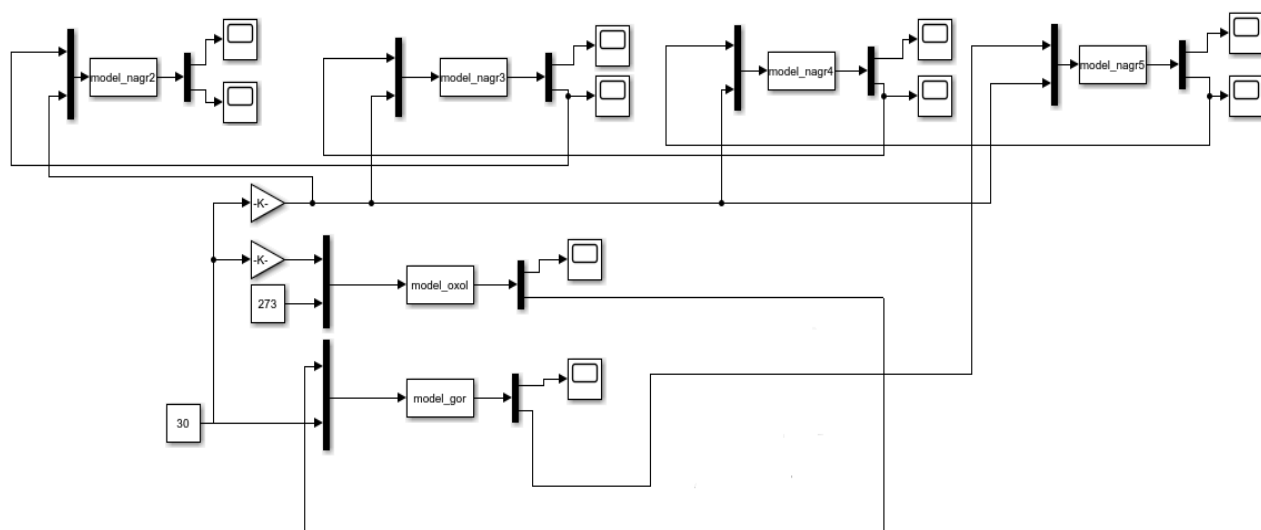


Рисунок 4.3. Схема реалізації об'єднання «елементарних» моделей в Simulink

Оскільки реалізована модель випалювання є модель в розподілених параметрах то в якості контрольованих можливо розглядати будь-яку точку температурного поля. Оскільки для коректного ведення процесу випалювання необхідно контролювати температурний режим заготовок, то контрольованою величиною запропоновано розглядати температуру заготовок, що випалюються. Саме тому структура MPC-регулятора має 5 контрольованих величин – температура в кожній із заготовок та одна керувальна величина – витрата палива.

Структура запропонованої системи керування на основі MPC-регулятора наведена на рис 4.4.

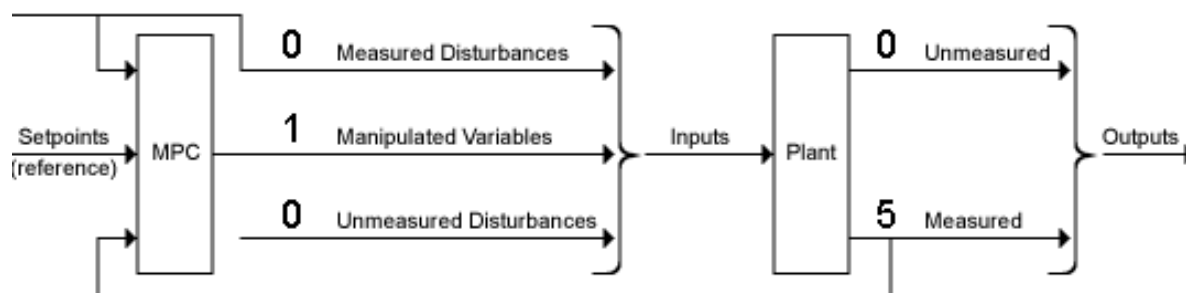


Рисунок 4.4. Структура системи керування на основі MPC -регулятора

На рисунку 4.5 наведена схема підключення MPC-регулятора в середовищі Simulink з описаною вище реалізацією об'єднання «елементарних» моделей процесу випалювання.

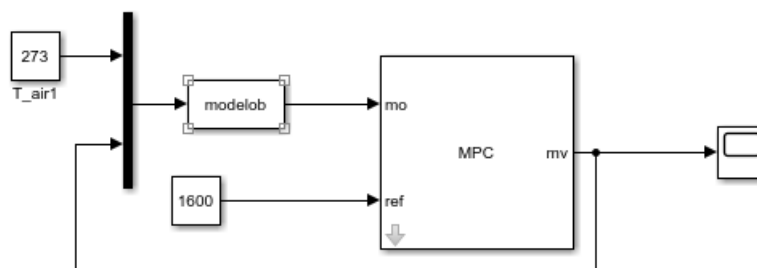


Рисунок 4.5 Схема підключення MPC-регулятора

Наступним кроком після завдання структури MPC-регулятора є налаштування його параметрів, таких як горизонт прогнозування, горизонт керування, обмеження на сигнали.

4.2.1. Дослідження впливу горизонту прогнозування MPC-регулятора

З опису [11-13] роботи регуляторів на базі прогнозуючих моделей зрозуміло, що вибір горизонту прогнозування є досить важливим елементом налаштування регулятора, тому при синтезі регуляторів даного класу необхідно врахувати особливості впливу даного параметру на перебіг процесу випалювання вуглецевих виробів.

Дослідження проводяться як порівняльний аналіз роботи синтезованого регулятора за різних горизонтів прогнозу, а саме 50 та 100 кроків.

Для прогнозуючого горизонтування в 50 кроків отримано наступну стратегія керування див. рис. 4.6:

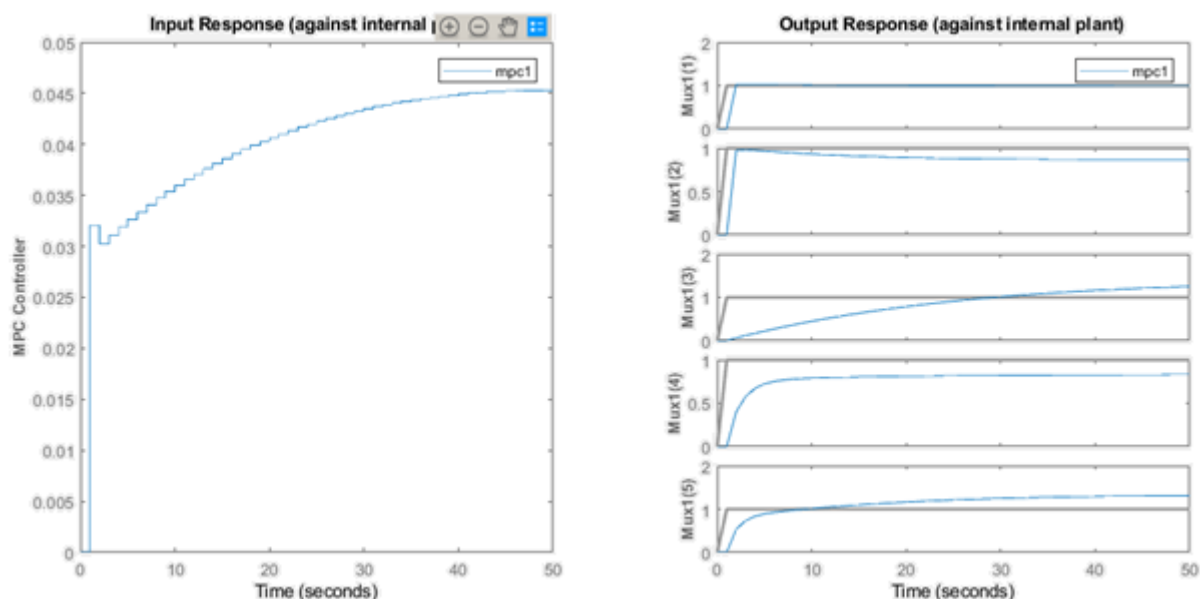


Рисунок 4.6. Стратегія керування для прогнозуючого горизонту в 50 кроків

Результати роботи розробленої системи керування протягом всієї кампанії випалювання наведено на рис. 4.7. Вектор керування отриманий в результаті роботи наведений на рис. 4.8. З графіків зміни температури заготовок видно плавне прогрівання заготовок протягом чотирьох етапів нагрівання камери печі димовими газами. Значний перепад температури на переході з одного етапу на інший пояснюється особливістю роботи печі, а саме необхідністю розкрити камеру печі для вставлення пальників, а тому піч наповнюється повітрям з навколишнього середовища. З графіку зміни керування (рис. 4.8) видно, що регулятор намагається компенсувати дану особливість, чим і пояснюється збільшена подача палива на початку етапу. Середнє значення витрати палива складає $44.1 \text{ м}^3/\text{год}$.

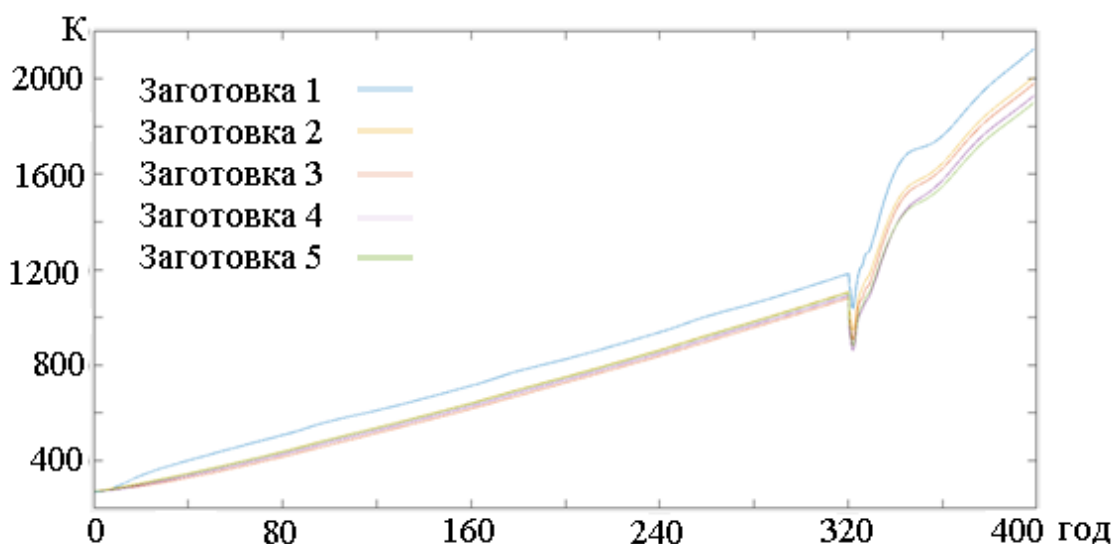


Рисунок 4.7. Графік зміни температури заготовок протягом кампанії випалювання з застосуванням МРС-регулятора для прогнозуючого горизонту в 50 кроків

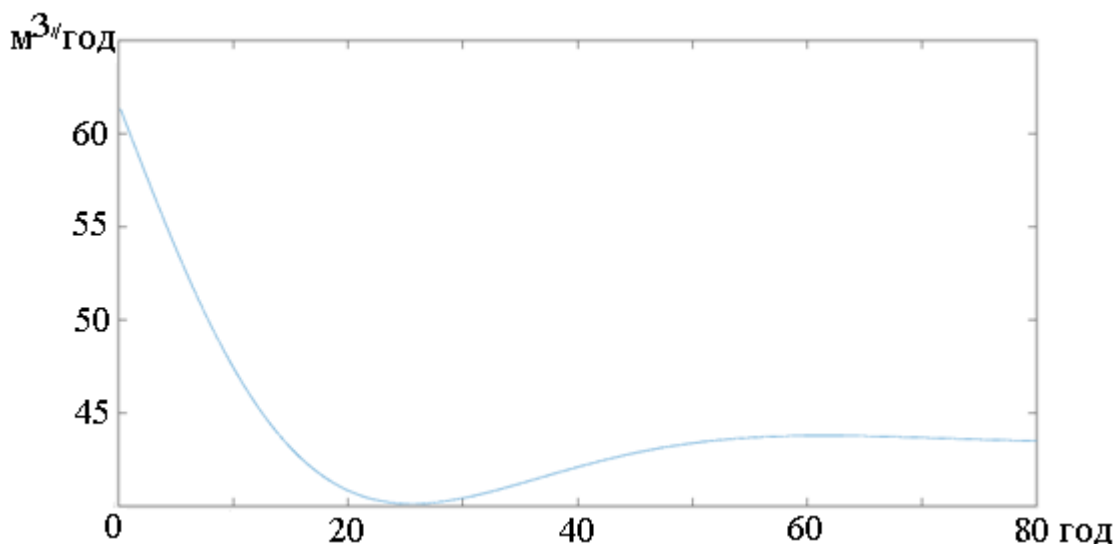


Рисунок 4.8. Графік зміни витрати палива протягом етапу камери під вогнем з застосуванням МРС-регулятора для прогнозуючого горизонту в 50 кроків

Дослідження якості роботи розробленої системи керування передбачає аналіз приросту температур в заготовках, див. рис. 4.9-4.10. З результатів слідує, що значення приросту температури при підігріванні димовими газами становить - 1.5...2,5 °С, що задовольняє рекомендаціям щодо досягнення цілісної структури заготовок. Максимальні значення перепаду прослідковуються в заготовці № 1, мінімальні відповідно у заготовці № 5, що пов'язано з особливістю роботи печі.

Приріст температури на етапі камера «під вогнем» можна охарактеризувати максимальним перепадом температури після переходу на новий режим роботи та

середнім значенням температури на робочому режимі, відтак для даного дослідження становить 120°C та $4-3^{\circ}\text{C}$.

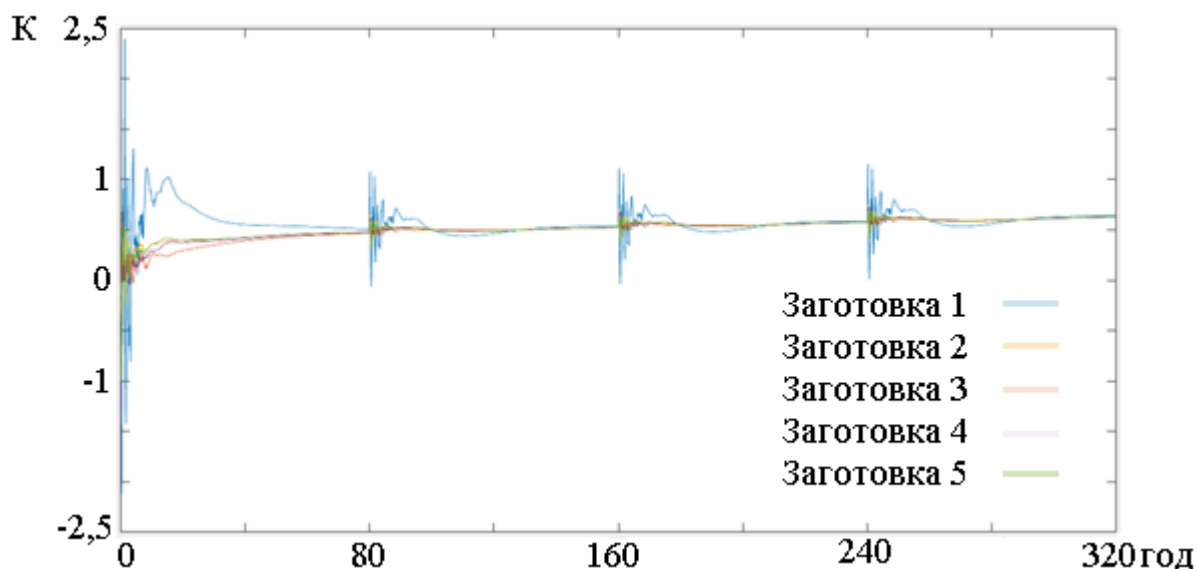


Рисунок 4.9. Графік приросту температур в заготовках протягом етапу камери на підігріванні з застосуванням МРС-регулятора для прогнозуючого горизонту в 50 кроків.

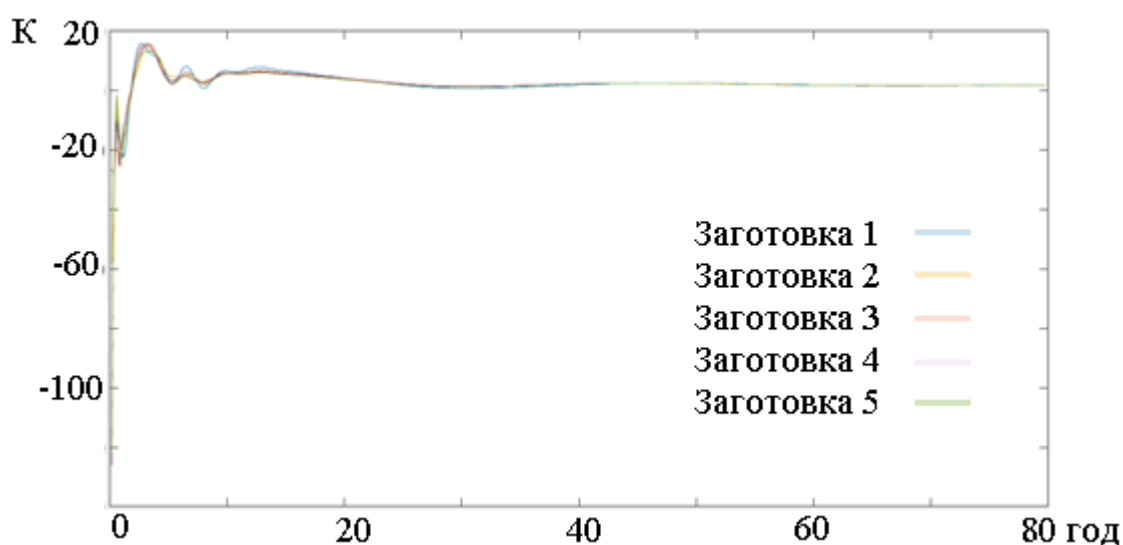


Рисунок 4.10. Графік приросту температур в заготовках протягом етапу камери «під вогнем» з застосуванням МРС-регулятора для прогнозуючого горизонту в 50 кроків.

Згідно з графіку зміни ентропії рис. 4.11 зрозуміло, що наприкінці етапу камери «під вогнем» всі заготовки будуть відповідати готовності відповідно до описаного вище критерію якості. Час готовності найхолоднішої заготовки орієнтовно складає 380 год, а найгарячішої 360 год.

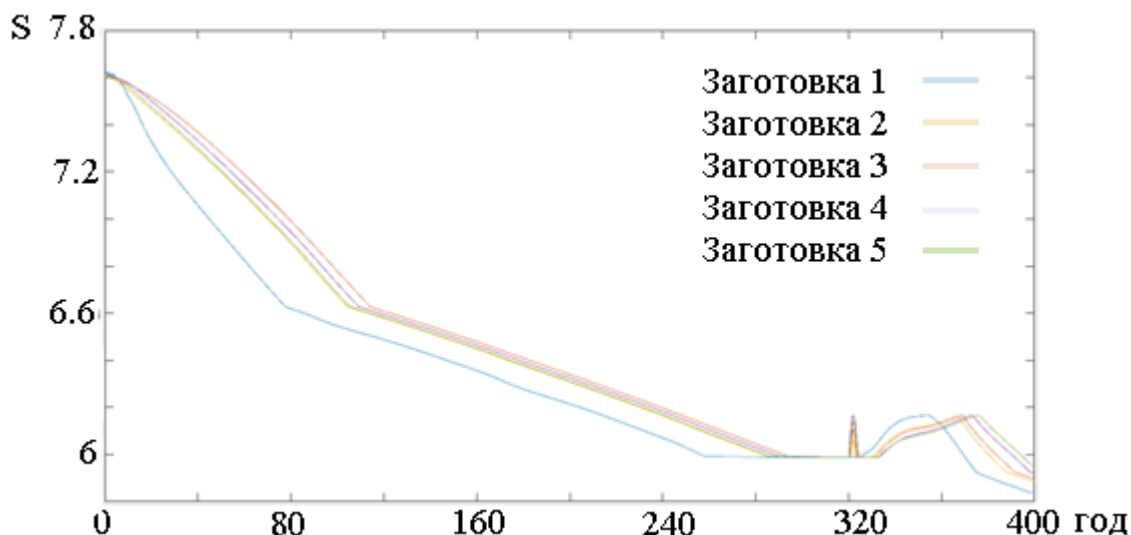


Рисунок 4.11. Графік зміни ентропії протягом кампанії випалювання для прогнозуючого горизонту в 50 кроків

Для прогнозуючого горизонту в 100 кроків отримано наступну стратегію керування див. рис. 4.12:

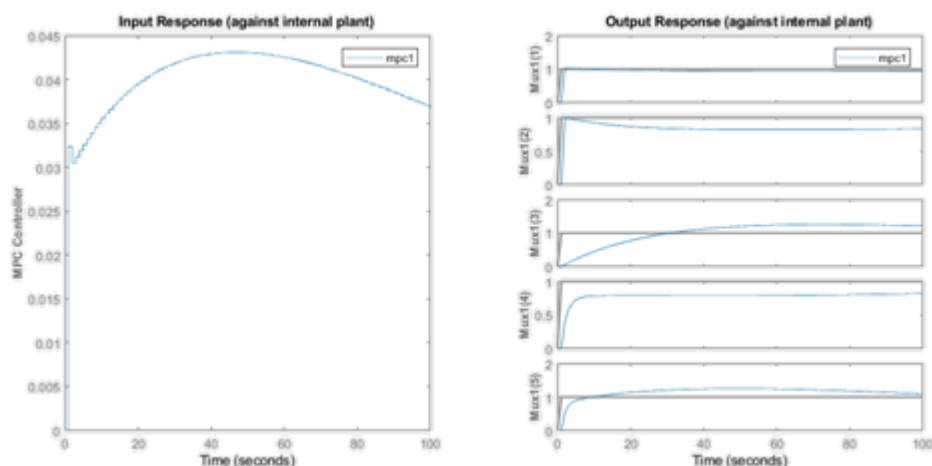


Рисунок 4.12. Стратегія керування для прогнозуючого горизонту в 100 кроків

Результати роботи розробленої системи керування на базі МРС-регулятора з прогнозуючим горизонтом в 100 кроків протягом всієї кампанії випалювання наведено на рис. 4.13. Зміна керування в результаті роботи запропонованого регулятора наведена на рис. 4.14. Максимальні температури досягнені заготовками за даним керуванням в середньому на 100 °С нижчі. Максимальна початкова витрата палива менша на 2-3 м³/год, а кінцеве значення вище на 1-2 м³/год, проте середнє значення витрати майже не змінилось та складає 44.2 м³/год.

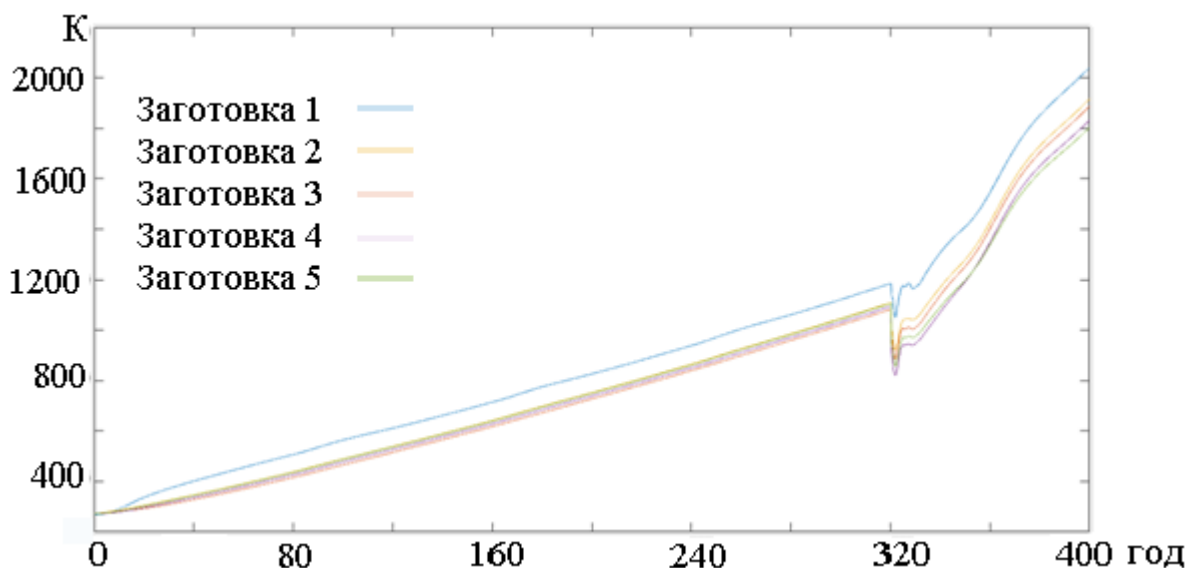


Рисунок 4.13. Графік зміни температури заготовок протягом кампанії випалювання з застосуванням МРС-регулятора для прогнозуючого горизонту в 100 кроків

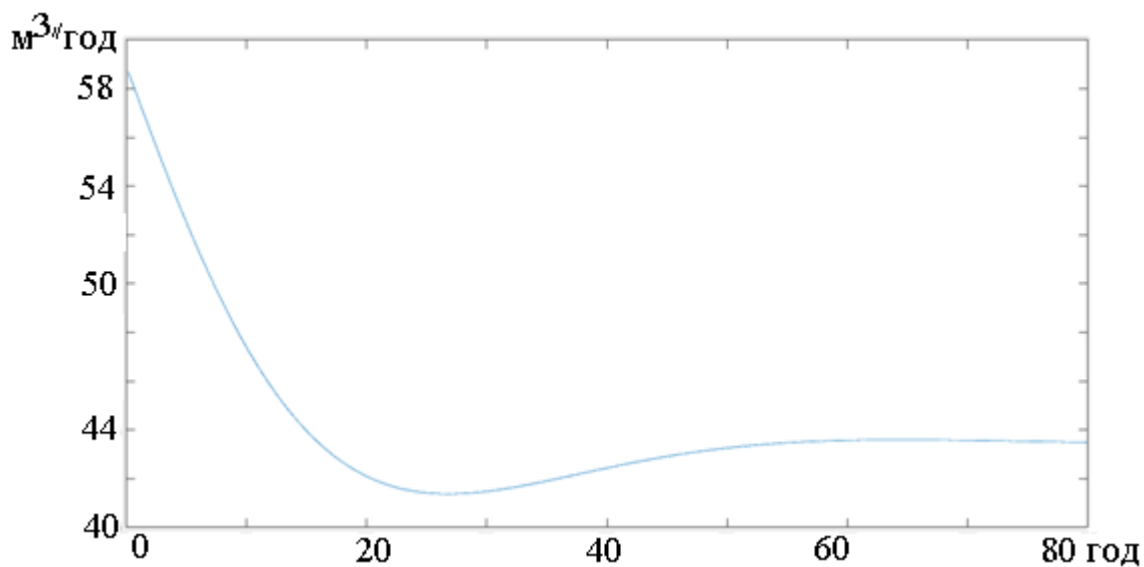


Рисунок 4.14. Графік зміни витрати палива протягом етапу камери «під вогнем» з застосуванням МРС-регулятора для прогнозуючого горизонту в 100 кроків

Аналіз приросту температур в заготовках, див рис 4.15-4.16. З результатів видно, що значення приросту температури при підігріванні димовими газами становить $-1.4 \dots 2.3$ °С, що задовольняє рекомендаціям для досягнення цілісної структури заготовок. Максимальний приріст температури на етапі камери «під вогнем» становить 180 °С а середній відповідно 4-3 °С.

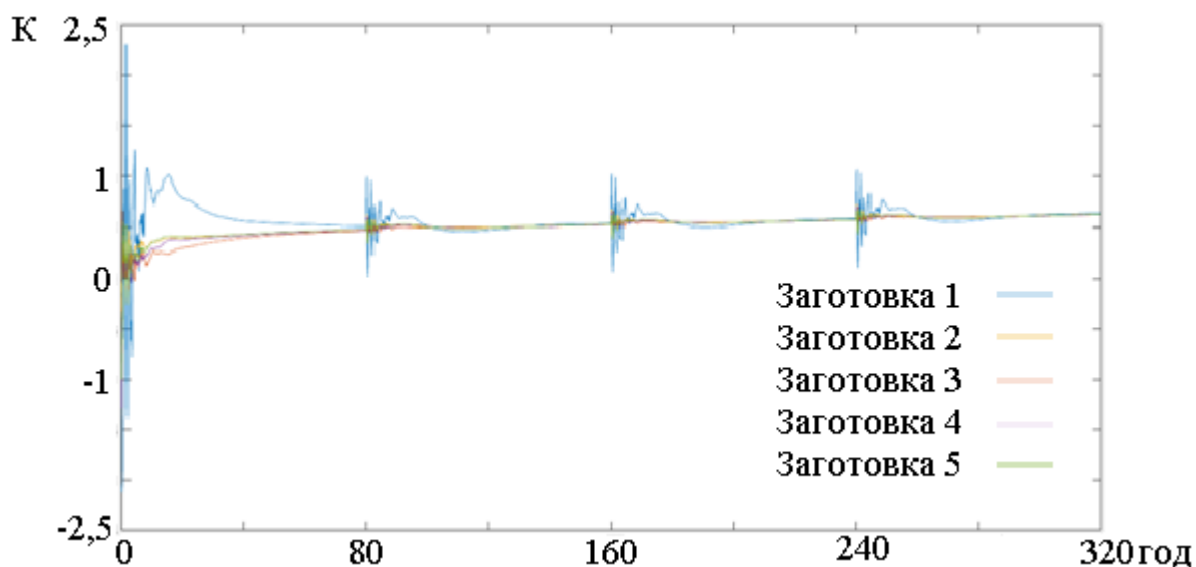


Рисунок 4.15. Графік приросту температур в заготовках протягом етапу камери на підігріванні з застосуванням МРС-регулятора для прогнозуючого горизонту в 100 кроків

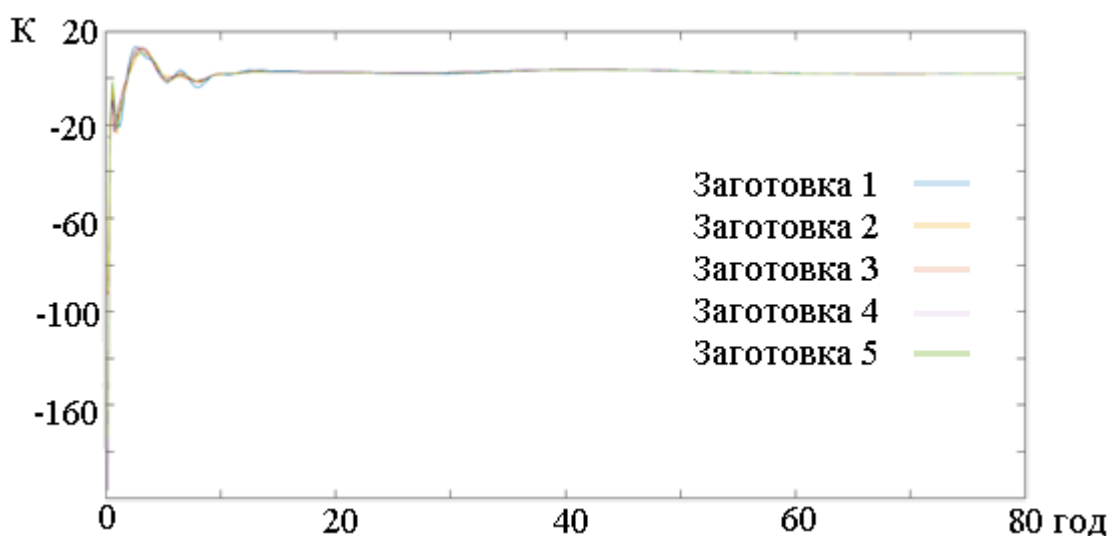


Рисунок 4.16. Графік приросту температур в заготовках протягом етапу камери «під вогнем» з застосуванням МРС-регулятора для прогнозуючого горизонту в 100 кроків

Як і в попередньому дослідженні, з аналізу графіку зміни ентропії можна зробити висновок, що наприкінці етапу камери «під вогнем» всі заготовки будуть відповідати критерію готовності. Час готовності найхолоднішої заготовки орієнтовно складає 395 год, а найгарячішої 374 год.

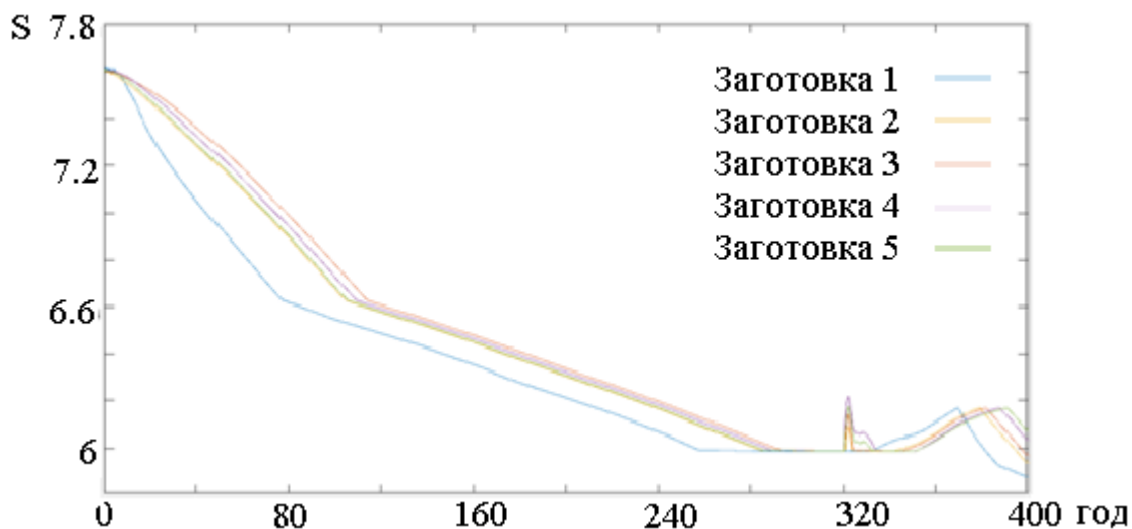


Рисунок 4.17. Графік зміни ентропії протягом кампанії випалювання для прогнозного горизонту в 100 кроків

Як впливає з результатів дослідження [14-15], збільшення горизонту прогнозування приводить до збільшення часу, необхідного на термічну обробку продукції з 360-380 год до 374-395 год, по найхолоднішій та найгарячішій заготовці відповідно.

В обох випадках не прослідковується значної зміни середнього значення витрати палива протягом всієї кампанії випалювання.

Позитивним явищем при збільшенні горизонту прогнозування є зменшення перепаду температур при нагріванні димовими газами, проте з іншої сторони збільшує перепад при переході від одного етапу роботи до іншого. З технології процесу випалювання відомо, що перепад при переході від одного етапу роботи до іншого майже не залежить від способу керування, а складає собою механічну складову процесу. Саме, тому можна вважати, що збільшення горизонту прогнозування має позитивний вплив на перебіг процесу випалювання вуглецевих виробів

4.2.2. Дослідження впливу горизонту управління МРС-регулятора

Аналогічно до попереднього дослідження, проте не менш важливим при налаштуванні регуляторів на базі прогнозуючих моделей, є горизонт керування. Саме тому при розробці оптимальних регуляторів даного класу необхідно

врахувати особливості впливу даного параметру на ведення процесу випалювання вуглецевих виробів.

Дослідження проводяться як порівняльний аналіз роботи синтезованого MPC- регулятора за різних горизонтів управління, а саме в 10 та 100 кроків.

Для горизонту управління в 10 кроків отримано наступний стратегія керування див. рис. 4.18:

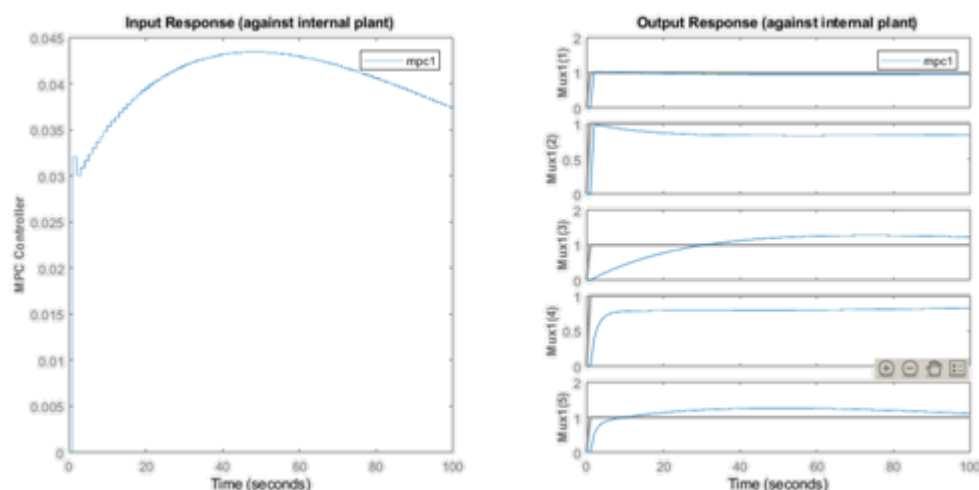


Рисунок 4.18. Стратегія керування для горизонту управління в 10 кроків

Графік зміни температури по всім заготовкам при роботі розробленої системи керування на базі MPC-регулятора з горизонтом управління в 10 кроків протягом всієї кампанії випалювання наведено на рис. 4.19. Зміна керування наведена на рис 4.20. Максимальна витрати палива складає $59 \text{ м}^3/\text{год}$ а кінцева $43 \text{ м}^3/\text{год}$, середнє значення складає $44.2 \text{ м}^3/\text{год}$.

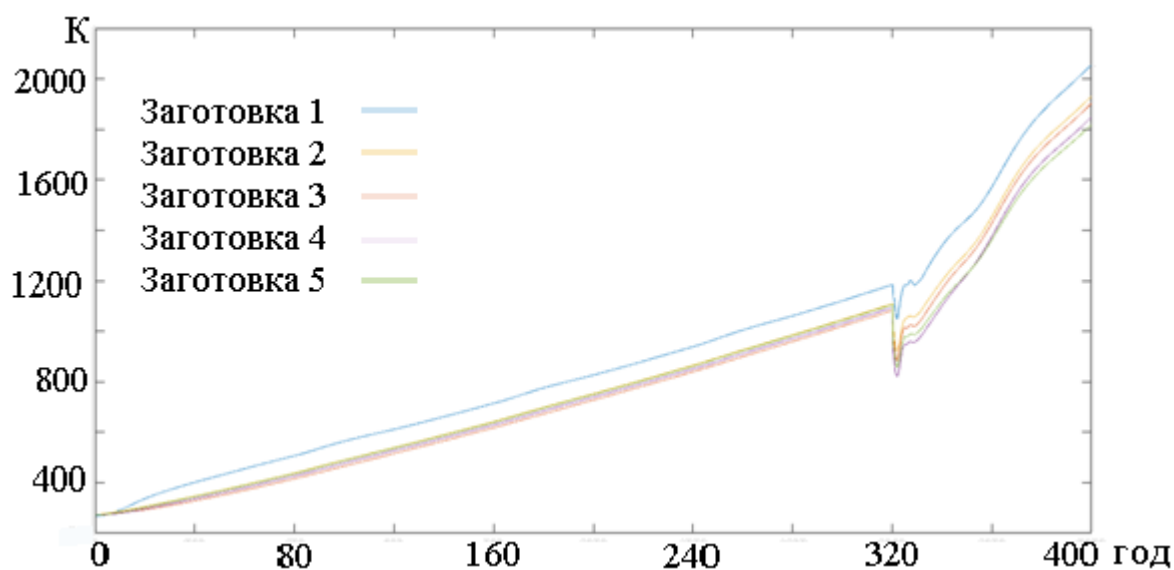


Рисунок 4.19. Графік зміни температури заготовок протягом кампанії випалювання з застосуванням МРС-регулятора для горизонту управління в 10 кроків

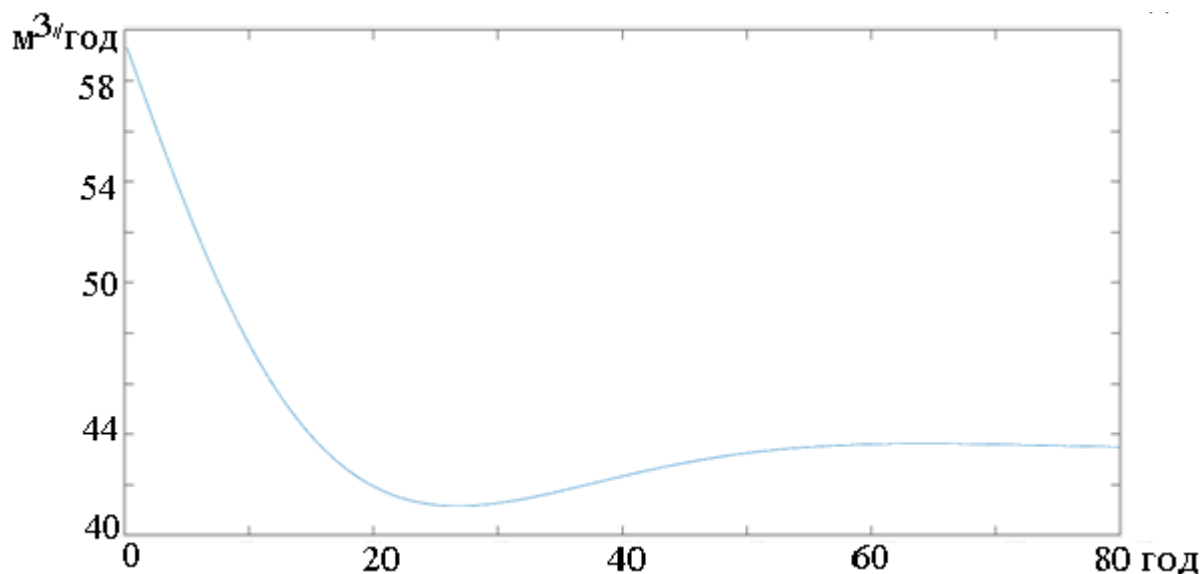


Рисунок 4.20. Графік зміни витрати палива протягом етапу камера «під вогнем» з застосуванням МРС-регулятора для горизонту управління в 10 кроків

Аналіз приросту температур в заготовках, див рис 4.21-4.22. З результатів видно, що значення приросту температури при підігріванні димовими газами становить $-2...2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, що задовольняє рекомендаціям для досягнення цілісної структури заготовок. Максимальні значення перепаду прослідковуються в заготовці №1, мінімальні відповідно у заготовці №5, що пов'язано з особливістю роботи печі. Максимальний приріст температури на етапі камера «під вогнем» становить $175\text{ }^{\circ}\text{C}$, а середній відповідно $4-3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

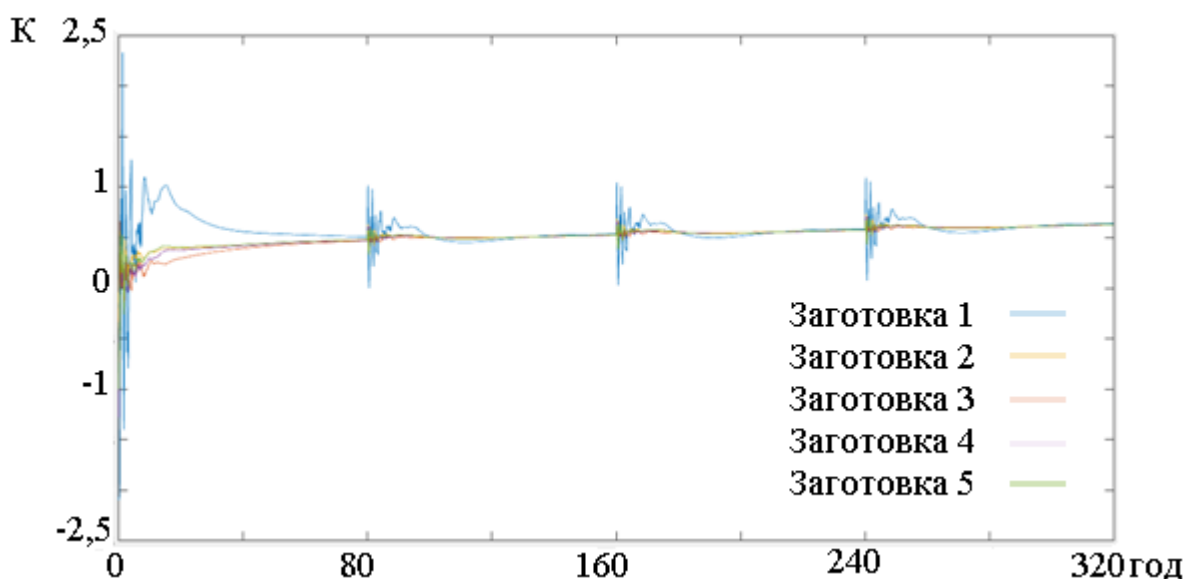


Рисунок 4.21. Графік приросту температур в заготовках протягом етапу камера на підігріві з застосуванням МРС-регулятора для горизонту управління в 10 кроків

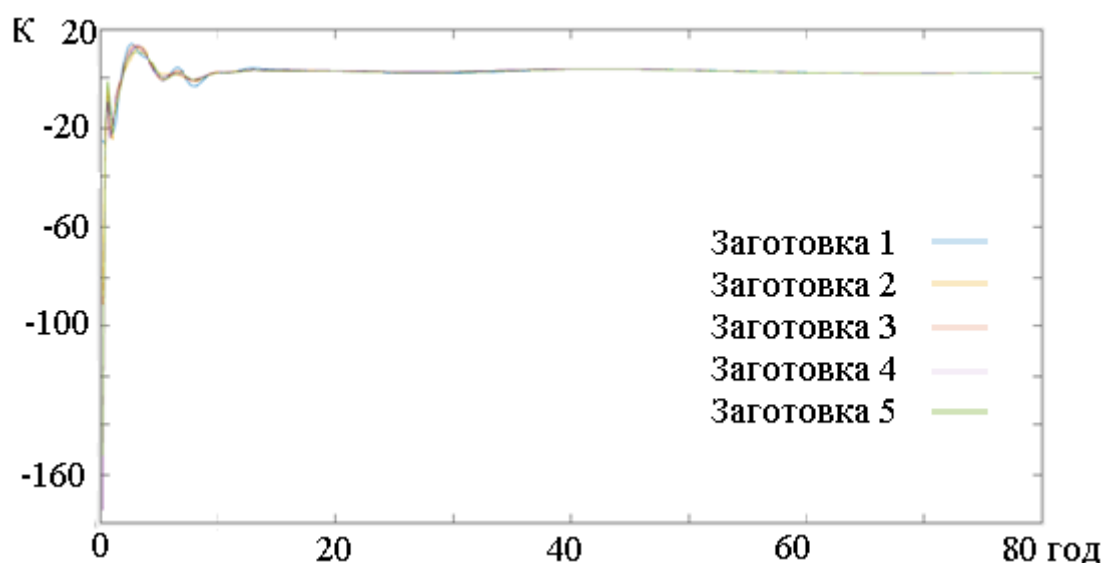


Рисунок 4.22. Графік приросту температур в заготовках протягом етапу камера «під вогнем» з застосуванням МРС-регулятора для горизонту управління в 10 кроків

Відповідно до графіку зміни ентропії видно, що наприкінці етапу камера «під вогнем» всі заготовки будуть відповідати готовності відповідно до критерію. Час готовності найхолоднішої заготовки орієнтовно складає 390 год, а найгарячішої 370 год.

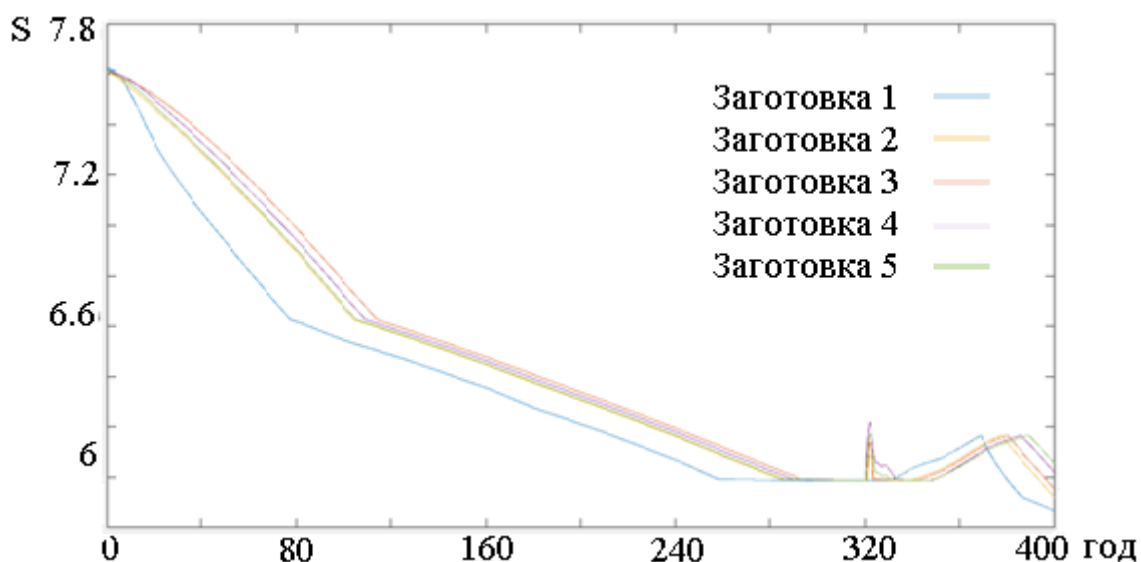


Рисунок 4.23. Графік зміни ентропії протягом кампанії випалювання для горизонту управління в 10 кроків

Для прогнозуючого горизонту в 100 кроків отримано наступну стратегію керування див. рис. 4.24:

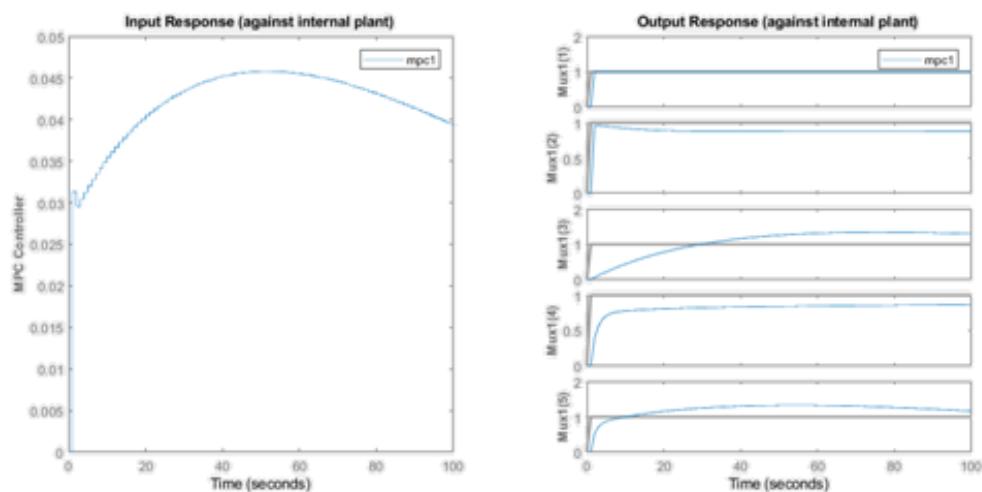


Рисунок 4.24. Стратегія керування для горизонту управління в 100 кроків

Графік зміни температури по всім заготовкам при роботі розробленої системи керування на базі MPC-регулятора з горизонтом управління в 100 кроків протягом всієї кампанії випалювання наведено на рис. 4.25. Зміна керування наведена на рис 4.26. Максимальна витрати палива складає $63 \text{ м}^3/\text{год}$ а кінцева $44 \text{ м}^3/\text{год}$, а середнє значення $44.1 \text{ м}^3/\text{год}$.

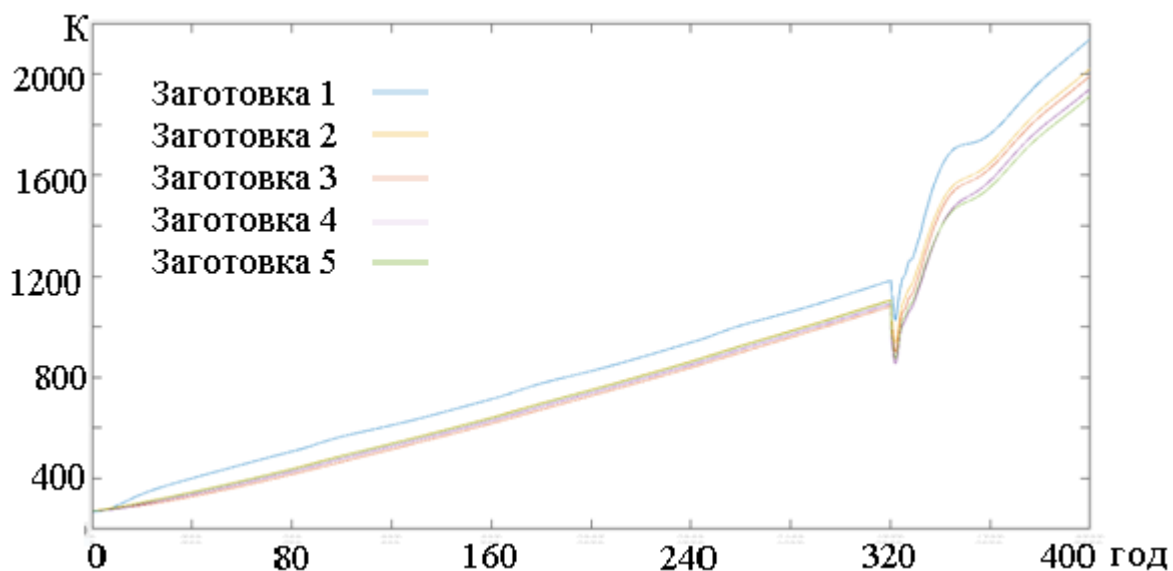


Рисунок 4.25. Графік зміни температури заготовок протягом кампанії випалювання з застосуванням MPC-регулятора для горизонту управління в 100 кроків

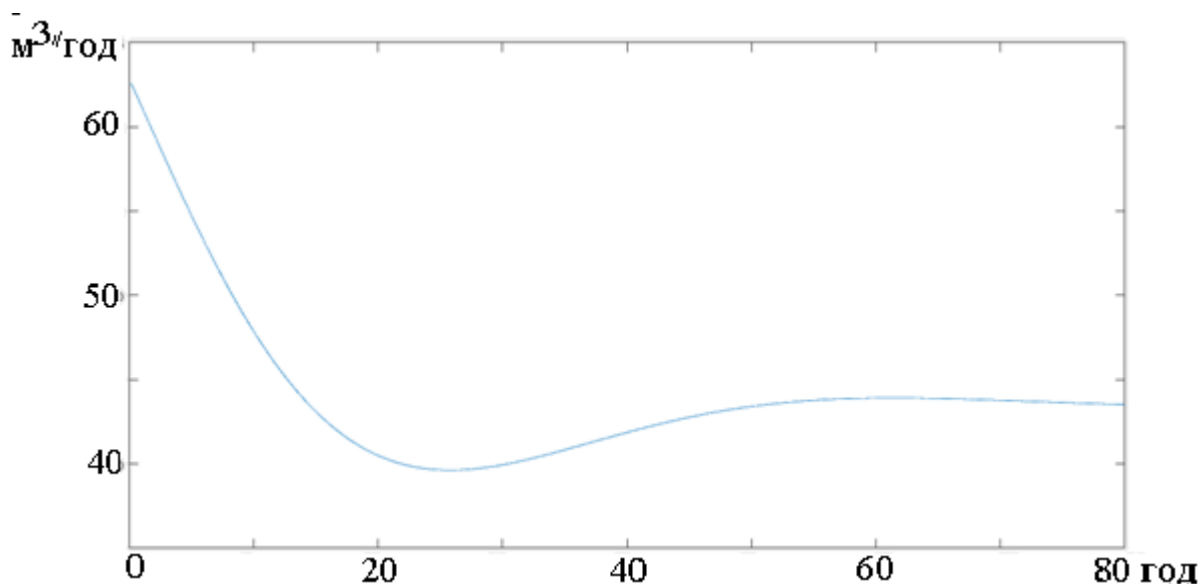


Рисунок 4.26. Графік зміни витрати палива протягом етапу камера «під вогнем» з застосуванням MPC-регулятора для горизонту управління в 100 кроків

Аналіз приросту температур в заготовках, див рис 4.27-4.28. З результатів очевидно, що значення приросту температури при підігріві димовими газами становить $-1.5 \dots 2.5$ $^{\circ}\text{C}$, що задовольняє рекомендаціям для досягнення цілісної структури заготовок. Максимальний приріст температури на етапі камера «під вогнем» становить 120 $^{\circ}\text{C}$ а середній відповідно 3 $^{\circ}\text{C}$.

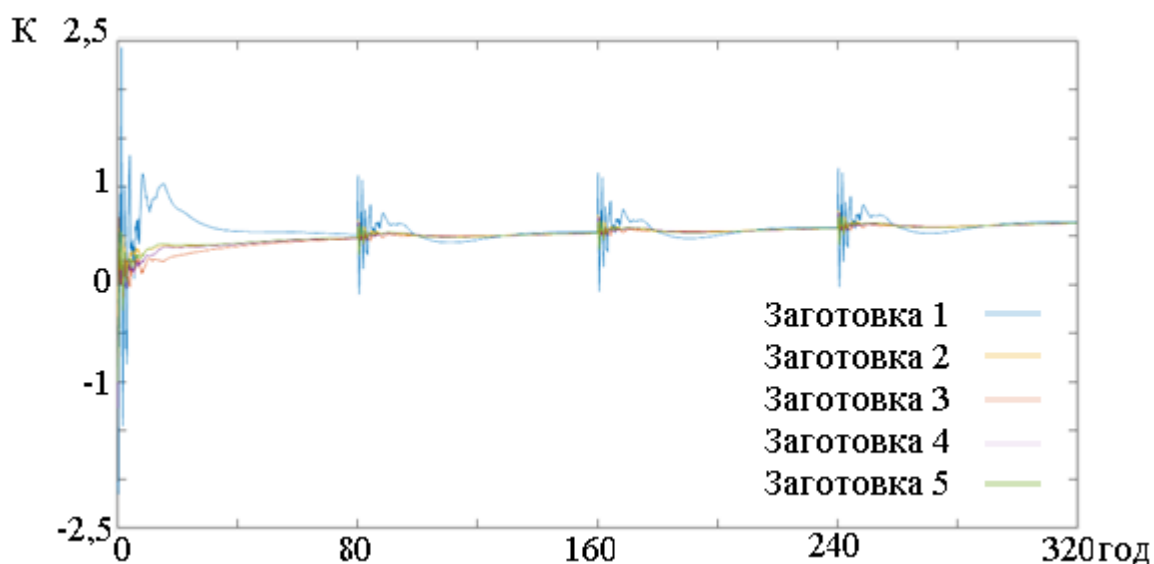


Рисунок 4.27. Графік приросту температур в заготовках протягом етапу камера на підігріві з застосуванням MPC-регулятора для горизонту управління в 100 кроків

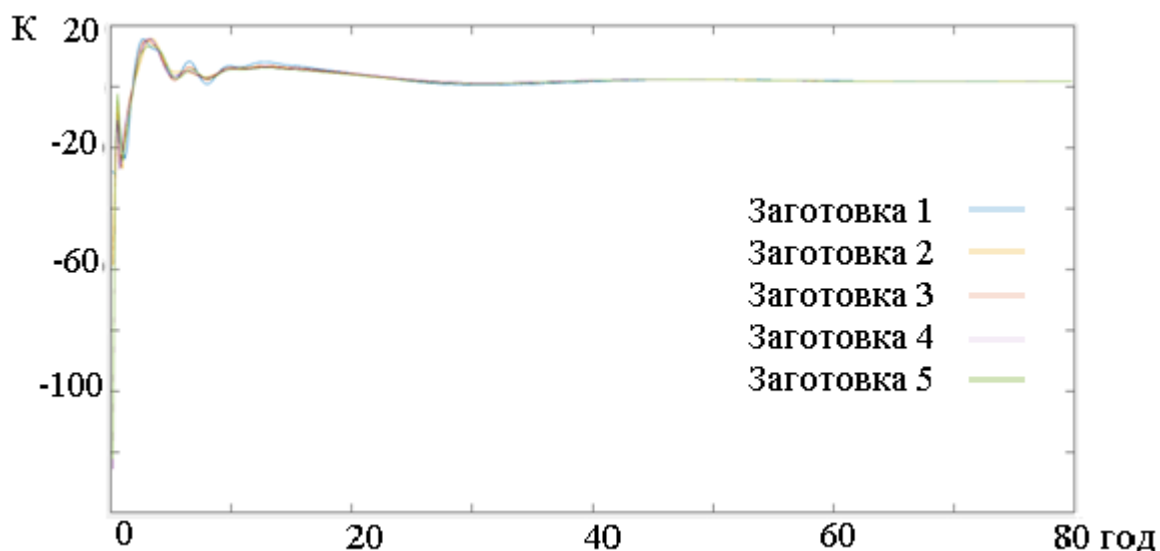


Рисунок 4.28. Графік приросту температур в заготовках протягом етапу камера «під вогнем» з застосуванням MPC-регулятора для горизонту управління в 100 кроків

Згідно з графіку зміни ентропії зрозуміло, що наприкінці етапу камера під вогнем всі заготовки будуть відповідати готовності відповідно до оговореного критерію. Час готовності найхолоднішої заготовки орієнтовно складає 380 год, а найгарячішої 350 год.

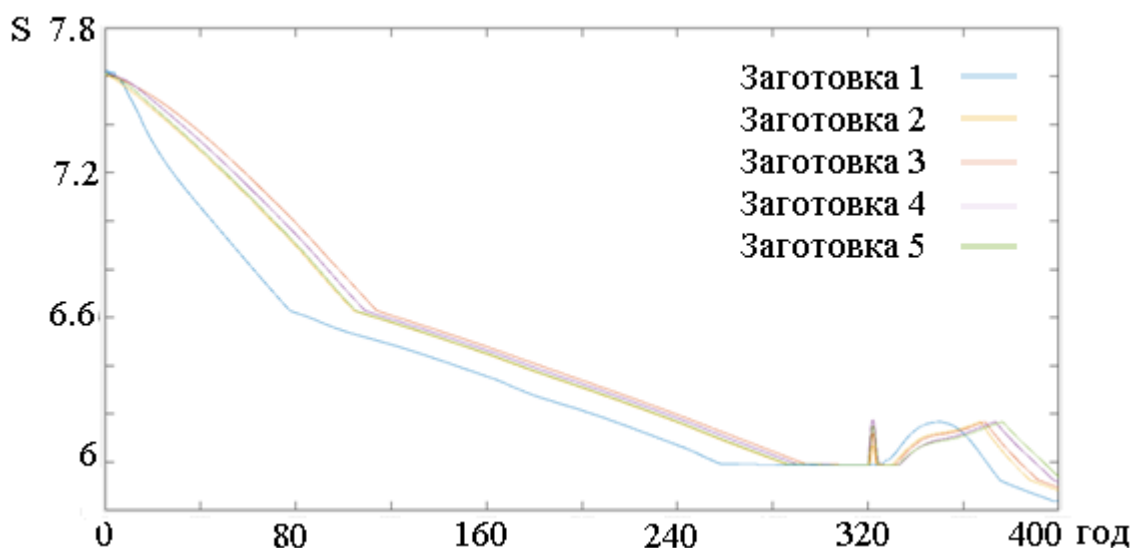


Рисунок 4.29. Графік зміни ентропії протягом кампанії випалювання для горизонту управління в 100 кроків

У висновках до даного дослідження необхідно сказати, що зменшення горизонту керування приводить до збільшення часу необхідного на термічну

обробку продукції, а саме з 350-380 год до 370-390 год по найхолоднішій та найгарячішій заготовках відповідно.

При збільшенні горизонту управління отримано, зменшення приросту температури в заготовках на етапі нагрівання димовими газами з $-2...2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-1.5...2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, а також на етапі камера «під вогнем» з $4-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4.3. Дослідження ефективності системи керування з МРС-регулятором

Для представлення результатів роботи МРС-регулятора та його порівняння з існуючим пропонується розглядати характерні заготовки, а саме найгарячішу № 1 та найхолоднішу № 5.

Для порівняння результатів пропонується розглядати класичний ПД-регулятор, налаштований методом Циглера - Ніколса та селективний ПД-регулятор, що являє собою стратегію вибору одного з п'яти ПД-регуляторів. Для обрання горизонту прогнозування та керування було проведено дослідження якості роботи системи керування відповідно від параметрів МРС-регулятора, за результатами дослідження пропонується обрати горизонт прогнозування 100 кроків, а горизонт керування 10 кроків.

При порівнянні графіків зміни керувальних величин очевидно, що ПД-регулятор використовує найбільшу витрату палива протягом всього етапу керування, середні значення витрати палива складає $54.8\text{ м}^3/\text{год}$ для класичного ПД-регулятора, $49.1\text{ м}^3/\text{год}$ селективного ПД-регулятора, $44.1\text{ м}^3/\text{год}$ для запропонованого МРС-регулятора. Очевидно, що найбільш економним є МРС-регулятор, для якого витрата палива менше на 24 % та 11 % відповідно.

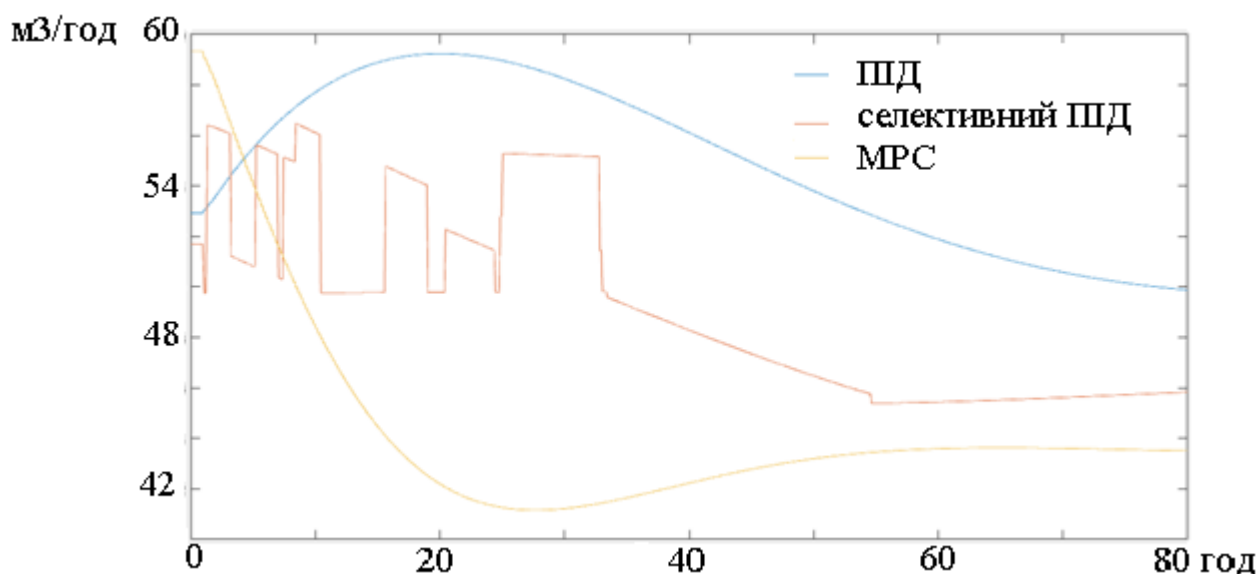


Рисунок 4.30. Графіки зміни керування

З графіків зміни температур по заготовкам №1 та №5 (рис. 4.31) прослідковується факт того, що перепад температур між заготовками найменший при використанні МРС-регулятора. З графіка зміни температур по заготовкам слідує, що класичний ПД-регулятор має найбільше значення перепаду температури між заготовками, а відповідно і найбільший градієнт по всій камері печі, що є негативним фактором, проте при такому керуванні перепад при переході з одного режиму на інший найменший. Найменше значення перепаду досягається за допомогою МРС-регулятора, проте кінцеве значення температур в заготовках при такому управлінні нижче в порівнянні з запропонованими варіантами.

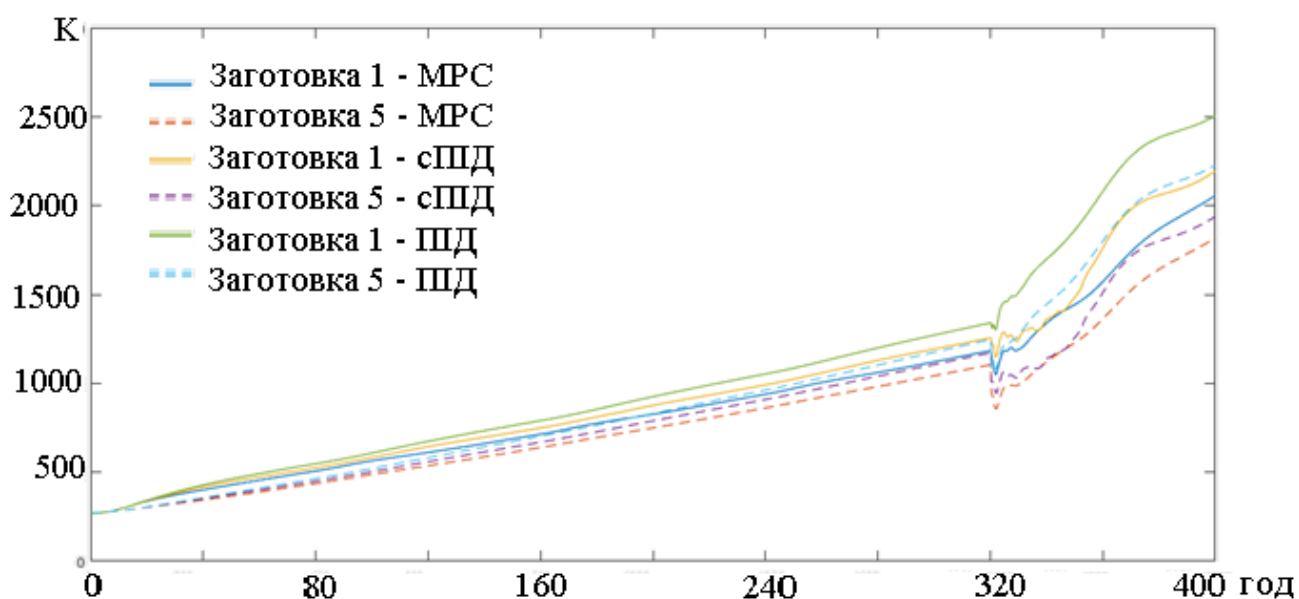


Рисунок 4.31. Графіки зміни температури заготовок

З графіків приросту температур (рис. 4.32) по заготовкам № 1 та № 5 видно, що найбільший приріст температур по заготовкам при нагріванні димовими газами прослідковується при використанні класичного ПІД-регулятора, найменший приріст забезпечує МРС-регулятор.

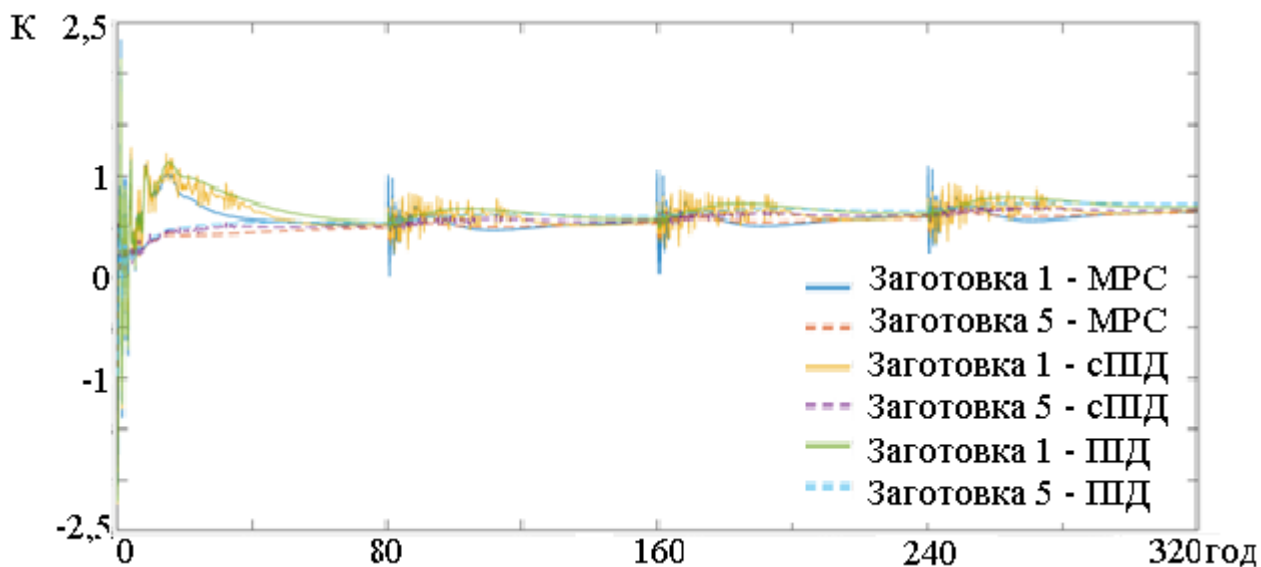


Рисунок 4.32. Графіки приросту температур заготовок

З графіків приросту температур на етапі камера під вогнем (рис. 4.33) по заготовкам №1 та №5 отримано, що найбільше середнє значення приросту температур по заготовкам прослідковується при використанні селективного ПІД-регулятора, найменший приріс забезпечує МРС-регулятор.

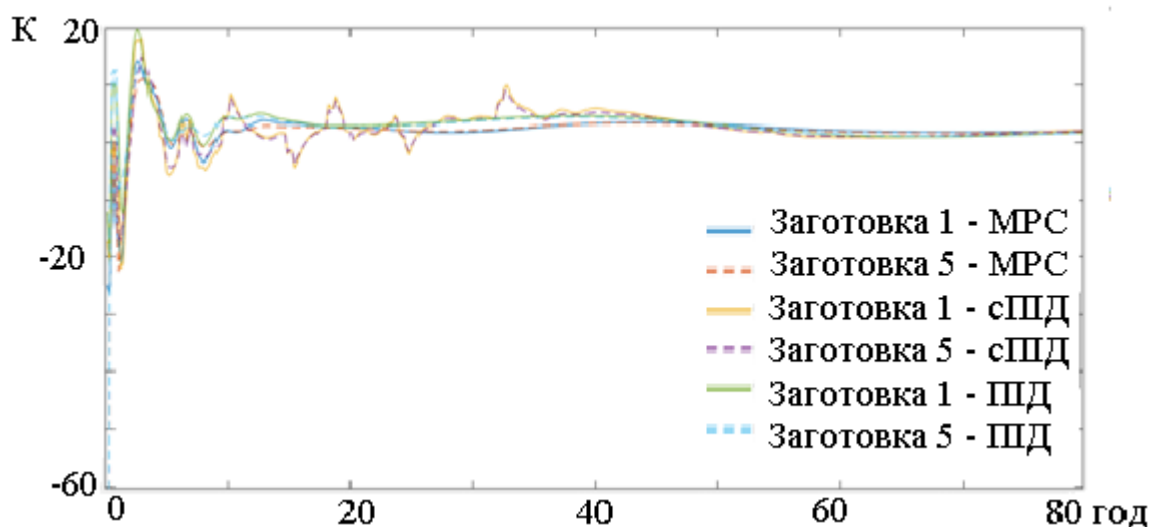


Рисунок 4.33. Графіки приросту температур заготовок

З аналізу графіків зміни ентропії стало зрозуміло, що всі регулятори забезпечують готовність продукції, причому ПД-регулятор найшвидше, а МРС-регулятор найповільніше.

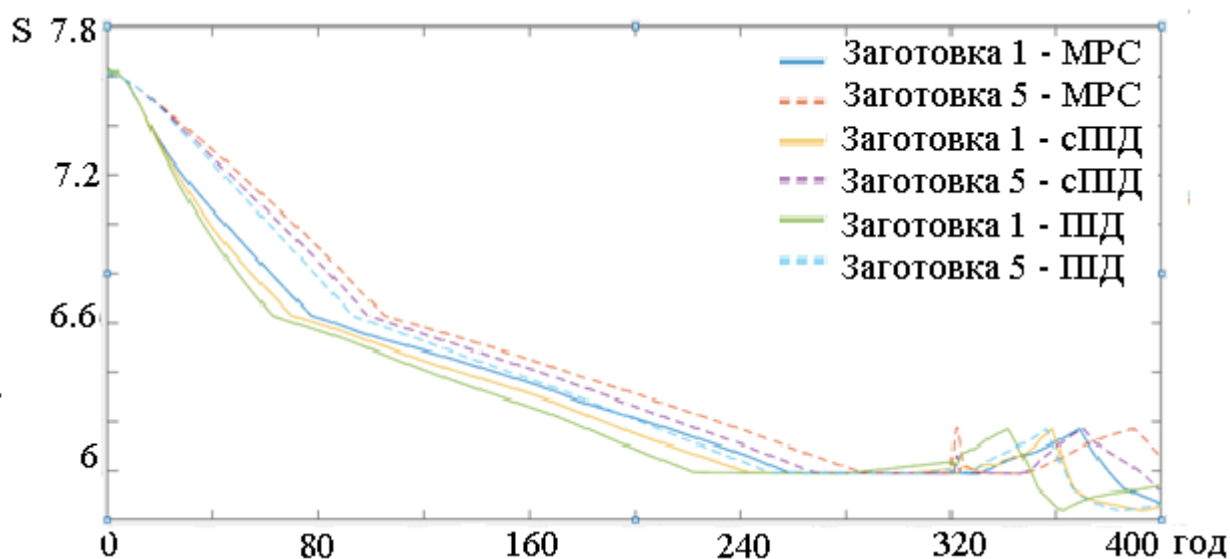


Рисунок 4.34. Графік зміни ентропії протягом кампанії випалювання

Порівнявши результати роботи наведених регуляторів отримано, що класичний ПД-регулятор програє майже по всіх розглянутих характеристиках, окрім перепаду температури при переходу від одного режиму роботи до іншого. Найближчим конкуруючим аналогом був селективний ПД-регулятор, що має хороші показники перепаду та приростів температур по всьому процесі випалювання. Проте реалізація наведеного на рис 4.30 керування, досить проблематична для виконавчих механізмів. Відтак доцільним є використання МРС-регулятор з хорошими показниками перепаду та приростів температур по всьому процесі випалювання, з досить простою реалізацією керування та можливістю доопрацювання необхідних особливостей зміною наведених горизонтів.

Висновки до розділу 4

1. Обґрунтовано роль етапу «камера під вогнем» як основного етапу кампанії випалювання вуглецевих виробів. Розроблено систему керування на базі МРС-регулятора для етапу «камера під вогнем» як основного етапу кампанії випалювання вуглецевих виробів.

2. Проведено дослідження впливу горизонтів прогнозування та керування на роботу системи керування процесом. Зменшення горизонту керування призводить до збільшення часу необхідного на термічну обробку продукції, а саме з 350-380 год. до 370-390 год. по найхолоднішій та найгарячішій заготовках відповідно. При збільшенні горизонту керування зменшується приріст температури в заготовках на етапі нагрівання димовими газами з $-2...2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-1.5...2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, а також на етапі камера «під вогнем» - з $4-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Збільшення горизонту прогнозування приводить до збільшення часу, необхідного на термічну обробку продукції з 360-380 год до 374-395 год, по найхолоднішій та найгарячішій заготовці відповідно. Позитивним фактором при збільшенні горизонту прогнозування є зменшення перепаду температур при нагріванні димовими газами.

3. Синтезовано систему керування процесом випалювання вуглецевих виробів з прогнозуючою моделлю на базі МРС-регулятора з врахуванням рекомендації, щодо налаштування горизонтів керування та прогнозування.

4. Проведено дослідження роботи запропонованої системи керування в порівнянні з існуючими на сьогоднішній день системами керування, результати якого продемонстрували ефективність розробленої системи. Результати порівняння роботи системи керування з МРС-регулятором з системами на основі ПД-регулятора та селективного регулятора показали, що витрата палива зменшується на 24 % та 11 % відповідно.

5. Система керування з МРС-регулятором забезпечує найменші перепади температур по заготовках, що позитивно впливає на якість готової продукції та зменшує кількість браку.

Список використаних джерел до розділу 4

1. Сошкин С. В. К возможности создания импульсной системы сжигания топлива для камерных печей. Цветная металлургия, 1998, №3, с.55-58.
2. Сошкин С. В. Проектирование оптимальной системы управления обжигом электродных изделий в камерных печах. Цветная металлургия, 1998, с.68-72,
3. Сошкин С. В., Априамов В. Н., Жуковецкий О. В. Цветные металлы, 1987, №9. 59. Системы оптимального управления обжигом электродных заготовок. Цветные металлы, 1998, №3, с.66-70.
4. Сошкин Г. С. Исследование процесса обжига электродной продукции в многокамерных печах и разработка системы оптимального управления : диссертация ... кандидата технических наук : 05.13.06 / Сошкин Григорий Станиславович; [Место защиты: Сев.-Кавказ. Гор.-металлург. Ин-т].- Владикавказ, 2012.- 178 с.: ил. РГБ ОД, 61 12-5/3751
5. Wolfgang Leisenberg «Method for controlling a carbon baking furnace». Patent of USA #US 6,436,335 B1. Aug. 20, 2002
6. «Model-Based Control of Strip Temperature for the Heating Furnace in Continuous Annealing» IEEE Transactions On Control Systems Technology, Vol. 6, No. 2, March 1998
7. Ke, X., Luo, Z., Zhu, Y. and Liu, Y. The Temperature Control System of Continuous Diffusion Furnace. DOI: 10.5220/0005996402270233 In Proceedings of the 13th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2016) - Volume 1, pages 227-233 ISBN: 978-989-758-198-4
8. Жученко О. А. Сучасний стан питання розробки систем керування процесом випалювання вуглецевих виробів / О.А. Жученко, А.П. Коротинський// Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології [текст]: Матеріали Шостої Міжнародної науково-практичної конференції молодих

учених, аспірантів і студентів (АКІТ-2019), Київ, 23-24 квітня 2019р. – КПІ ім. Ігоря Сікорського, «Політехніка». С. 107-108.

9. Математичне моделювання складного теплообміну повітряних регенераторів /Є. М. Панов, А. Я. Карвацький, І. Л. Шилович, С. В. Лелека, І. В. Пулінець [Текст] :монографія. — К. : НТУУ «КПІ», 2011. — 103 с.

10. Жученко О.А., Коротинський А.П., Хібеба М.Г. Математичне моделювання енергоємних технологічних процесів вуглеграфітового виробництва [текст] : монографія. –К.:КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 344 с.:іл. – 300 прим. ISBN 978-617-7503-56-8.

11. Qin S J, Badgwell T A. A survey of industrial model predictive control technology. Control Engineering Practice, 2003, 11(7): 733-764.

12. Parisio A, Rikos E, Glielmo L. Stochastic model predictive control for economic/environmental operation management of microgrids: An experimental case study [J]. Journal of Process Control, 2016, 43:24-37.

13. Grosso J M, Ocampo-Martínez C, Puig V, et al. Chance-constrained model predictive control for drinking water networks[J]. Journal of Process Control, 2014, 24(5):504-516.

14. Zhuchenko O. Investigation influence of predict gorizont of mpc-regulator for control of the baking process/ O. Zhuchenko, A. Korotynskyi // Slovak international scientific journal VOL.2, №37, 2020

15. Жученко О. А. Дослідження впливу горизонту прогнозування MPC-регулятора при синтезі системи керування процесом випалювання / О.А. Жученко, А.П. Коротинський // Матеріали VI Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами», 20 листопада 2019. [Електронний ресурс] – К: НУХТ, 2019 – 300 с.

РОЗДІЛ 5 СИСТЕМА КЕРУВАННЯ НА БАЗІ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

5.1. Постановка задачі синтезу системи керування печею випалювання вуглецевих виробів на базі штучних нейронних мереж

На сьогоднішній день в зв'язку із зростанням обчислювальних можливостей, набувають все більшого поширення штучні нейронні мережі для вирішення широкого класу задач. Загальне коло завдань, що вирішуються штучними нейронними мережами налічує в собі: класифікацію образів, кластеризацію/категоризацію, зниження розмірності, апроксимацію функцій, передбачення/прогнозування і т.д. [1-2]

З аналізу особливостей роботи багатокамерної печі випалювання та існуючих систем керування випливає, що для якісного керування процесом випалювання необхідно реалізувати якісний (точний) прогнозувач температури для даного процесу. В даний момент із задачею прогнозування часових рядів добре справляються штучні нейронні мережі. Відтак для реалізації прогнозувача обрано математичний апарат нейронних мереж.

Очевидно, що для визначення якості заготовок шляхом застосування ентропії як критерію якості достатньо лише значення температур по заготовкам. Проте такий підхід робить неможливим врахування впливу інших складових печі на температури в заготовках, а відтак на точність прогнозу. Саме тому, кращим варіантом буде прогнозування температурного поля печі вцілому.

Зрозуміло, що з прогнозованих даних при всіх можливих варіантах керування можливе формування площини ентропії як показника готовності виробів. Обравши точку готовності продукції (кінцеву точку), тобто завершення кампанії випалювання, можливо сформулювати керування, що забезпечить досягнення кінцевої точки з початкових умов, для отримання продукції заданої якості за заданим критерієм, наприклад за мінімальний час або для мінімізації затрат палива.

З описаного вище видно, що даний підхід мало в чому відрізняється від запропонованого МРС-регулятора. Не менш важливими недоліками отриманих в результаті керувань є ймовірність порушення цілісності заготовки через недотримання температурних обмежень. Очевидним вирішенням даної проблеми є обмеження керування в тому діапазоні, що забезпечує дотримання всіх температурних обмежень. При порушенні температурних обмежень в заготовках виникають термічні напруження, що при досягненні порогового значення можуть призвести до дефекту в заготовках у вигляді тріщин. З іншого боку порушення температурних обмежень дає можливість сформувати більш гнучку ефективну систему управління даним процесом, наприклад зменшити час, потрібний на термічну обробку заготовок.

Для вирішення даної проблеми пропонується прогнозувати умовну величину - ймовірність наявності дефекту у виробі. Обравши різні регламенти, при яких було отримано бездефектну структуру у всіх заготовках (тобто ймовірність браку 0%) та режими при яких було отримано брак у всіх виробках (ймовірність браку 100%), за допомогою здатності до узагальнення можливо отримати нейронну мережу, що здатна визначати ймовірність браку в проміжних режимах та при інших умовах ведення кампанії. Відтак, при можливості прогнозування ймовірності дефекту продукції можливе отримання вектору керування, що забезпечить отримання продукції відповідної якості, в даному випадку під терміном якість розглядаються тепло-фізичні властивості продукції, такі як теплоємність, електропровідність і т.д. з бездефектною структурою, при частковому порушенні температурних обмежень.

З літератури відомо [3-5], що брак продукції в основному виникає через недотримання температурних обмежень при веденні кампанії випалювання, які очевидно будуть відзначатись на температурному полі. Пропонується використовувати нейронні мережі для аналізу температурного поля та визначення ймовірності браку в кожній з заготовок.

Складністю при розробленні даної системи керування є обмежена кількість експериментальних даних, на яких можна навчити штучну нейронну мережу

прогнозувати ймовірність дефекту. Оскільки при навчанні прогнозувача температур дані можливо згенерувати за допомогою математичної моделі процесу і їх кількість умовно необмежена, то для якісного навчання мережі визначення ймовірність дефекту необхідно змінити підхід.

З вище сказаного випливає, що постановка задачі розробки системи керування процесом випалювання вуглецевих виробів на базі штучних нейронних мереж включає в себе вирішення двох основних задач:

- розроблення нейромережевого прогнозувача температурних полів;
- розроблення нейронної мережі визначення ймовірності дефекту.

5.2. Розроблення нейромережевого прогнозувача температурних полів

Процес розробки нейромережевого прогнозувача температур для процесу випалювання вуглецевих виробів як і для розробки будь-якої нейронної мережі складається з ряду типових задач:

- підготовка даних для навчання нейронної мережі;
- вибір архітектури нейронної мережі;
- навчання нейронної мережі;
- аналіз отриманих результатів.

5.2.1 Підготовка даних для навчання нейронної мережі

Для поставленої задачі процес підготовки даних представляє собою формування навчальних та тестових вибірок з відношенням по об'єму 10:1 для навчання та валідації нейромережі з наступними особливостями:

кількість точок, що прогнозуються дорівнюють кількості точок з яких формується температурне поле. В нашому випадку, дорівнює кількості нодів (вузлів), отриманих при математичному моделюванні в середовищі ANSYS, тобто 12428;

початкові умови для прогнозування складаються з вектору поточного температурного поля, від якого буде проводитись прогнозування, та вектору керування. Саме тому розмірність вхідної вибірки становитиме $[12428 \text{ (поточне температурне поле)} + U(\text{керування}) \times n]$, де n кількість зразків/варіантів на яких буде проводитись навчання;

час одного прогнозу безпосередньо залежить від описаних вище двох вибірок, оскільки, у вхідній вибірці будуть значення температур в момент часу t , а у вихідній $t+1$. Оскільки, в даному випадку дані генеруються в результаті математичного моделювання, то t – крок моделювання, в нашому випадку 15 хвилин.

5.2.2 Вибір архітектури нейронної мережі

Прорив в напрямку машинного навчання, штучного інтелекту призвів до досить широкого діапазону існуючих на сьогоднішній день архітектур нейронних мереж розроблених конкретно для прогнозування. На даному етапі запропонована елементарна структура нейромережі – перцептрон з послідовними зв'язками (див. рис. 5.1.) з лінійною функцією активації.

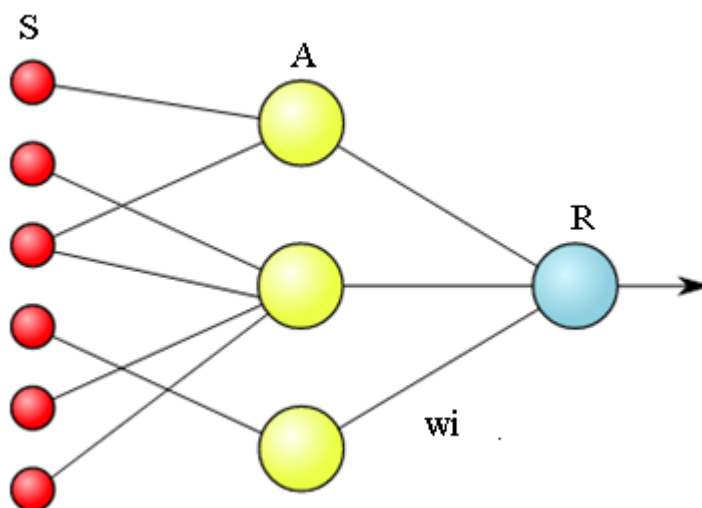


Рисунок 5.1. Логічна схема перцептрону

Обрання даної структури на даному етапі обумовлене рядом переваг:

Повнозв'язна структура перцептрону, тобто та при якій кожен попередній нейрон зв'язаний з всіма наступними, дозволяє враховувати вплив всіх нейронів на вихідний результат, а тому можливо процес визначення температур в кожній конкретній точці у векторі відповідно до їх геометричного положення не має важливого значення.

В нашому випадку дана структура дозволить враховувати вплив температури всіх складових печі. Наприклад, температура пересипки в поточному температурному полі буде мати вплив на температуру заготовок в прогнозованому температурному полі.

При якісному навчанні нейромережі, дана структура дозволить виділити вектор керування як одну із найважливіших «асоціацій» для отримання вихідного поля. Простота даної структури дозволяє представляти вхідні дані у вигляді вектора, що не передбачає попереднього їх форматування.

Лінійна функція активації дозволяє отримувати на виході з мережі значення в діапазоні $(-\infty, \infty)$.

Розмірність запропонованої мережі складає: вхідний шар – 12428 (поточне температурне поле) + U (керування) нейронів, прихований шар – вдвічі більший за вхідний, вихідний шар – 12428 нейронів.

5.2.3 Навчання нейронної мережі

Зрозуміло, що на якість роботи прогнозувача температурних полів, окрім описаних вище особливостей, буде впливати і сам процес навчання мережі. У якості оптимізатора пропонується використовувати поширений оптимізатор Adam з функцією зменшення швидкості навчання при застої похибки відтворення.

При валідації результатів роботи нейромережі отримано абсолютну похибку відтворення в 3 °С, що при використанні для випалювання вуглецевих виробів становить менше 1%.

Відбір з результатів прогнозу лише тих точок що відповідають температурам в заготовках дозволяє побудувати площину зміни ентропії в залежності від

діапазону керування та на заданий час прогнозу. Отримана площа дозволяє судити/оцінювати про готовність продукції на той чи інший момент часу при всіх можливих керуваннях.

5.2.4 Дослідження ефективності роботи прогнозувача температурних полів

Для представлення результатів роботи розробленого прогнозувача з матриці спрогнозованих температур була обрана точка, що розміщена в центрі заготовки. Результати роботи описаного вище прогнозувача наведено на рис 5.2. Прогнозування проводилося на 400 ітерацій при діапазоні можливих витрат палива 0,22 – 0,36 м/с. Точність роботи прогнозувача не досліджувалась, оскільки при навчанні та валідації на тестовій вибірці була отримана похибка менше одного відсотка.

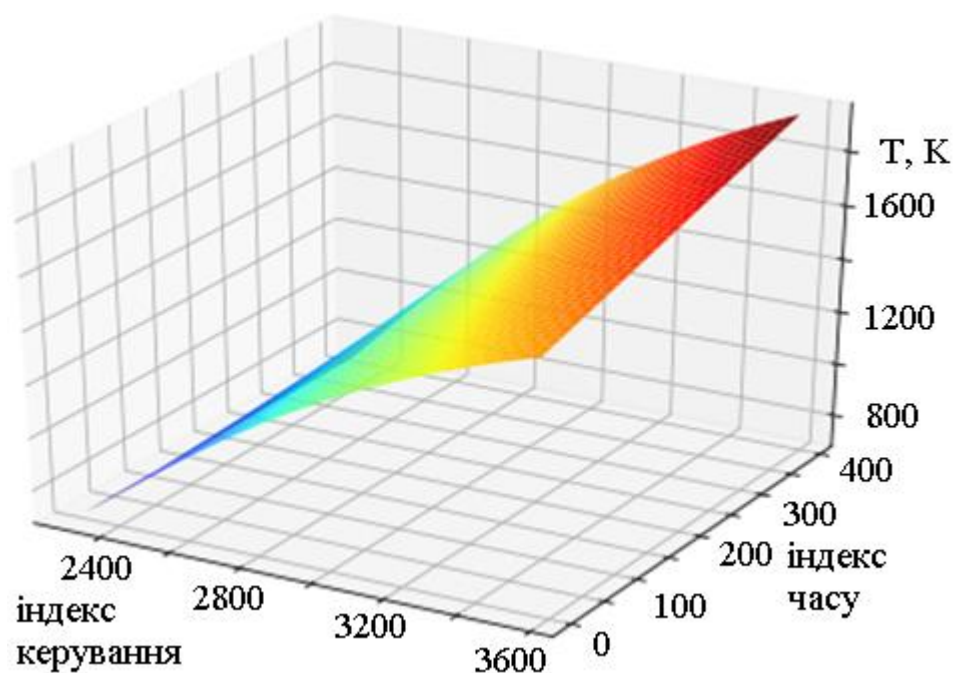


Рисунок 5.2. Площина спрогнозованих температур для контрольної точки

З отриманого в результаті прогнозування температурних полів було побудовано площину ентропії для контрольної точки однієї заготовки, що наведена на рис. 5.3. З рисунка видно «гребінь», що характеризує собою завершення процесу випалювання відповідно, до критерії якості. Очевидно, що

досягнення цього рубежу можливе різними шляхами, що залежать від керування та часу обробки.

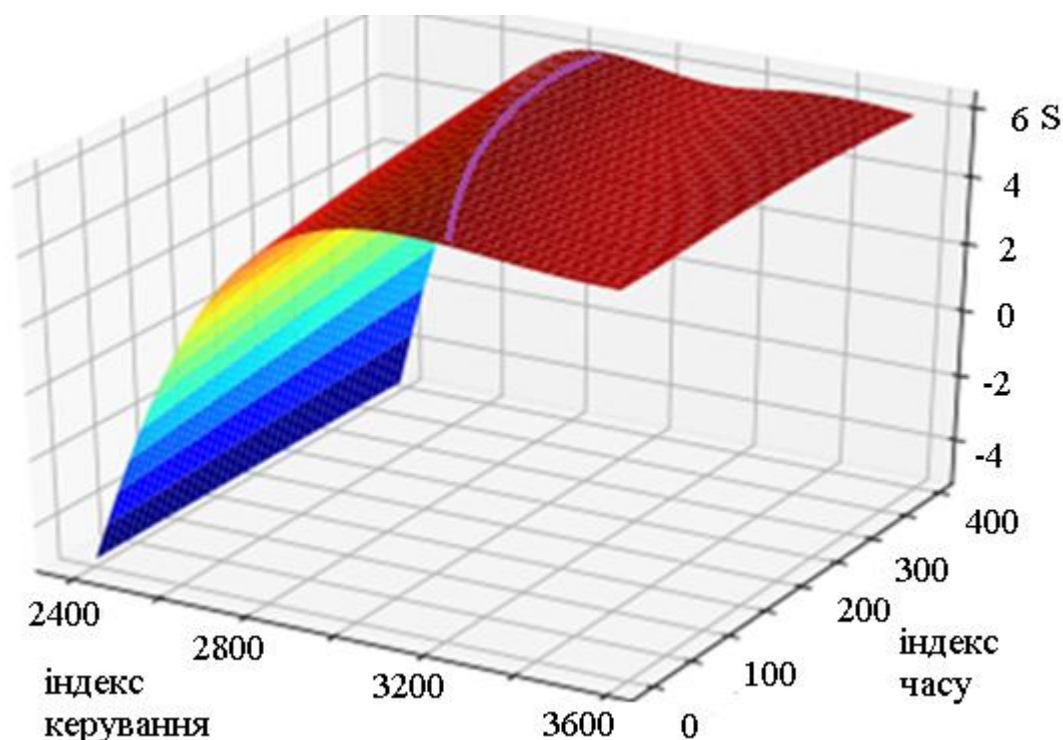


Рисунок .5.3. Площина спрогнозованої ентропії для контрольної точки

Очевидно, що використовуючи отримані дані, можливо сформувати вектор керувань для отримання продукції заданої якості за мінімальний час (або мінімізації затрат палива).

5.3. Нейронна мережа для визначення дефектів у заготовках

З постановки задачі випливає, що при розробці нейронної мережі для визначення ймовірності дефекту в заготовках постає проблема обмеженої кількості даних для навчання мережі. З аналізу літератури [6-9] випливає, що для випадків обмеженості навчальних вибірок, застосовується підхід використання автоенкодера для переднавчання нейронної мережі.

5.3.1 Визначення ймовірності дефекту із застосуванням автоенкодера

Автоенкодер (Autoencoder, AE) - це нейронна мережа прямого поширення, що відновлює вхідний сигнал на виході з мережі, загальна структура автоенкодера наведена на рис. 5.4.

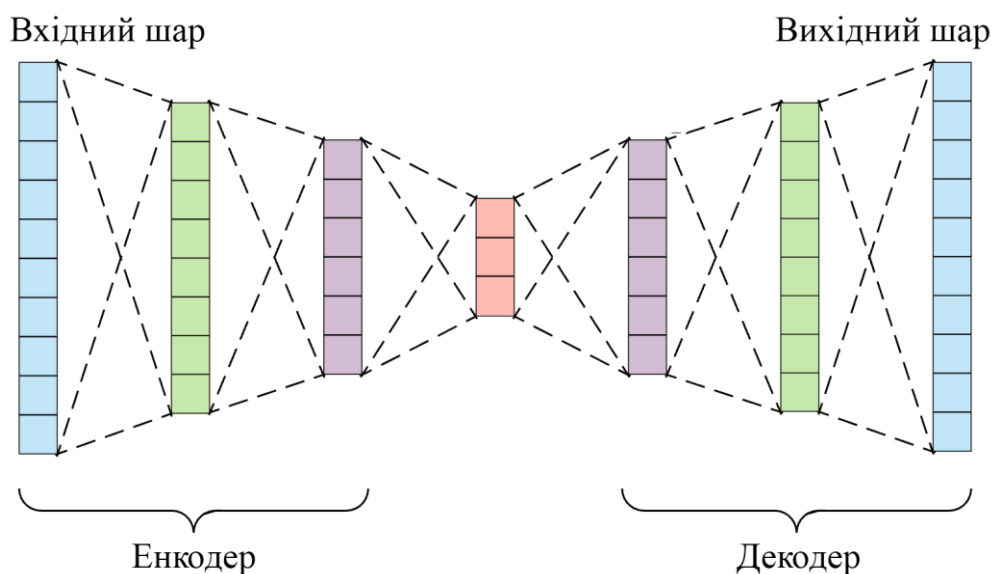


Рисунок 5.4. Загальна структура автоенкодера

Автоенкодери деформують вхідні дані для отримання їх стиснутої репрезентації, а потім відновлюють з цього подання вихідні дані. Основною метою роботи автоенкодерів - отримати на вихідному шарі відгук, найбільш близький до вхідного. Зазначене вище виконується з метою формування (виявлення) закономірностей у прихованому шарі енкодера. Структурна характерна особливість автоенкодерів - кількість нейронів у вхідному та у вихідному шарі однакова.

Можливість штучного формування корисних властивостей в прихованому шарі при забезпеченні відтворення інформації задовільної якості, дозволяє використовувати автоенкодери в багатьох різноманітних випадках, а саме: згладжування шуму, зниження розмірності, стискання даних, переднавчання.

Один зі способів отримання корисних властивостей від автоенкодера – обмежити прихований шар розмірами меншими, ніж вхідний. В цьому випадку вхідний сигнал відновлюється з помилками через втрати під час проходження прихованого шару, проте, щоб їх мінімізувати, мережа змушена вчитися відбирати найбільш важливі ознаки в прихованих шарах.

Ця особливість лежить в можливості використання автоенкодера для розроблення (переднавчання) нейромережі для прогнозування ймовірності дефекту. Навчання автоенкодера на температурних полях дає в результаті готову для використання нейромержу з заданою кількістю нейронів в середньому шарі, а відтак, основних наважливіших властивостей. Використання зазначених основних ознак дозволяє в повному обсязі відтворити ціле поле, а в нашому випадку сформувати та використати ці ознаки для визначення дефекту продукції.

Відтак навчання автоенкодера для відтворення температурних полів не обумовлює проблеми обмеження даних, а при доданні до якісно навченого енкодера (саме енкодера – половини автоенкодера) шару прогнозування дозволяє отримати нейромержу для визначення ймовірності браку з не навченим лише одним шаром, загальний вигляд якої наведений на рис. 5.5.

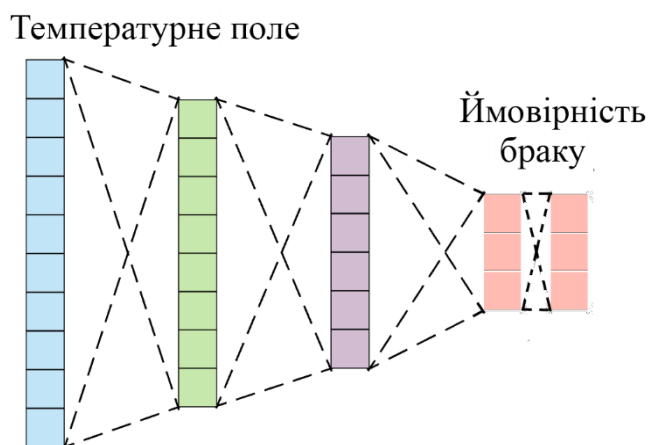


Рисунок 5.5. Нейронна мережа для прогнозування дефекту на базі енкодера

Зрозуміло що подальше навчання відбувається на обмеженій вибірці з цільовими значеннями ймовірності браку.

Розроблення нейронної мережі визначення ймовірності дефекту у заготовках протягом кампанії випалювання вуглецевих виробів складається з двох основних етапів:

1. Використання автоенкодера для визначення цінних властивостей та переднавчання нейромережі.

Відповідно до призначення та завдань, які вирішуються з застосуванням автоенкодерів зрозуміло, що кількість нейронів у вхідних і вихідних шарах однакова, та в нашому випадку складає кількості нодів, тобто - 12428.

В якості функції активації пропонується лінійна функція активації, з причини потреби отримання на виході з мережі значень температури в діапазоні $[0, +\infty]$

Оскільки автоенкодер призначений для відтворення вхідних даних на виході, то для навчання необхідна одна вибірка, що подається у якості і вхідної та цільової.

Оскільки енкодер буде використовуватись для прогнозування ймовірностей дефекту кожної з заготовок, то цілком очевидно, що найменший прихований шар буде мати розмірність що дорівнює кількості заготовок. В нашому випадку 5.

2. Додавання ймовірнісного шару до отриманого автоенкодера з визначеними важливими залежностями та навчання прогнозувача наявності браку.

Для отримання на виході з розробленої нейромережі значень ймовірності в діапазоні $[0-1]$ використовується softmax-функція активації у вихідному шарі.

5.3.2. Дослідження процесу визначення ймовірності дефекту

Отримані в результаті роботи ймовірності наявності дефектів у всіх заготовках були порівняні та обране максимальне (одне з п'яти) значення, яке і було використане для побудови площини максимальної ймовірності дефекту протягом ведення кампанії випалювання (див. рис. 5.6.) Площина характеризує зміну максимальної ймовірності дефекту для усіх заготовок, тобто максимальну з прогнозованих в кожен момент прогнозу для кожної з заготовок. Отримані результати показують, що максимально можлива ймовірність дефекту для наведеного випадку складає 35 %.

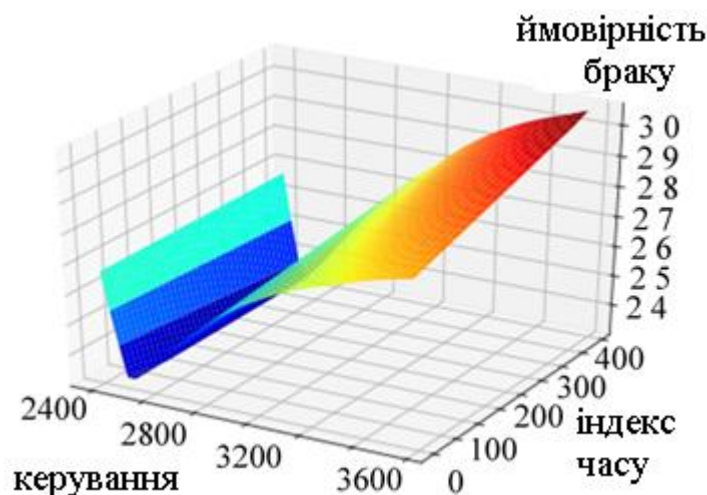


Рисунок 5.6. Площина прогнозованої максимальної ймовірності дефекту

Використання отриманих ймовірностей дефекту та ентропії протягом всього прогнозу дозволяє сформувати вектори керування для отримання продукції з мінімальною кількістю дефектних структур або для безпечного прискорення процесу випалювання.

5.4. Оптимальний спуск

Отриманих в попередніх розділах даних достатньо для формування вектору оптимального керування. В даному випадку, у якості критерію оптимального керування розглядається мінімізація ймовірності браку готової продукції.

Для отримання вектору оптимального керування, необхідно для всіх можливих значень готовності продукції за ентропією знайти ймовірність дефекту. Точка з мінімальним значення ймовірності і буде кінцевою точкою, що характеризує мінімальну ймовірність дефекту готової продукції при заданому періоді прогнозу та діапазону можливих керувань. В результаті роботи алгоритму результати наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 Результати роботи визначення ймовірності дефекту

Кількість кроків часу	Індекс керування	Ймовірність браку
23	1	$0.18240754306316376 \cdot 10$
23	2	$0.25131818652153015 \cdot 10$
23	3	$0.28239530324935913 \cdot 10$
23	4	$0.4057566821575165 \cdot 10$
22	5	$0.535310685634613 \cdot 10$

22	6	0.6981990933418274*10
22	7	0.8430591225624084*10
22	8	0.9726049900054932*10
21	9	1.078462839126587*10
21	10	1.1832488775253296*10
21	11	1.278643012046814*10
21	12	1.3660612106323242*10
20	13	1.4332995414733887*10
20	14	1.5074079036712646*10
20	15	1.576467752456665*10
20	16	1.6411817073822021*10
20	17	1.7020872831344604*10
19	18	1.743881344795227*10
19	19	1.7981891632080078*10
19	20	1.849945068359375*10
19	21	1.8994861841201782*10
19	22	1.947014927864074*10
18	23	1.9749425649642944*10
18	24	2.018734216690063*10
18	25	2.0610761642456055*10
18	26	2.102114677429199*10
18	27	2.1419789791107178*10
18	28	2.1807172298431396*10
17	29	2.198488712310791*10
17	30	2.234912872314453*10
17	31	2.3026294708251953*10
17	32	2.3751614093780518*10
17	33	2.446424961090088*10
17	34	2.516404390335083*10
17	35	2.5851337909698486*10
16	36	2.624559164047241*10
16	37	2.6902763843536377*10
16	38	2.7547643184661865*10
16	39	2.818108320236206*10
16	40	2.88108320236206*10

В результаті виконання розрахунків отримано, що мінімальна ймовірність браку готової продукції прослідковується при керуванні з індексом керування – 1 протягом 23 кроків часу.

Обравши в якості початкової зазначену точку необхідно, перебираючи значення ймовірності всіх індексів керувань в кожен попередній індекс часу,

знаходити мінімальне значення, та зберігати оптимальне значення керування на кожному з кроків.

В результаті роботи для даного випадку було отримано, що з точки 23,1 для забезпечення мінімальної ймовірності дефекту потрібно рухатись по траєкторії що наведено у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2. Траєкторія оптимального керування

Індекс часу	Індекс керування
1	15
2	10
3	1
4	1
5	1
6	1
***	***
21	1
22	1

Індекс 1 по управлінні відповідає витраті палива 0,243 м/с, індекс 10 – 0,27 м/с, індекс 15 – 0,285 м/с, а індекс 23 по часу відповідає 86 год. Відповідно до регламенту витрата палива складає 0,27 м/с.

Отримані результати показують, що для досягнення мінімального дефекту та виробництва продукції відповідно якості необхідно вести кампанії випалювання на мінімальній витраті палива з максимально довгим часом обробки, що повністю узгоджується з відомими літературними даними.

5.5. Дослідження процесу визначення ймовірності дефекту

Для аналізу отриманих результатів розробленої системи керування проводиться порівняння її роботи з існуючою на сьогоднішній день системою на базі ПД-регулятора. На рис. 5.7. наведено графік зміни керувальних величин для обох регуляторів. З результатів видно, що при використанні нейромережевого регулятора середнє значення витрати палива нижче.

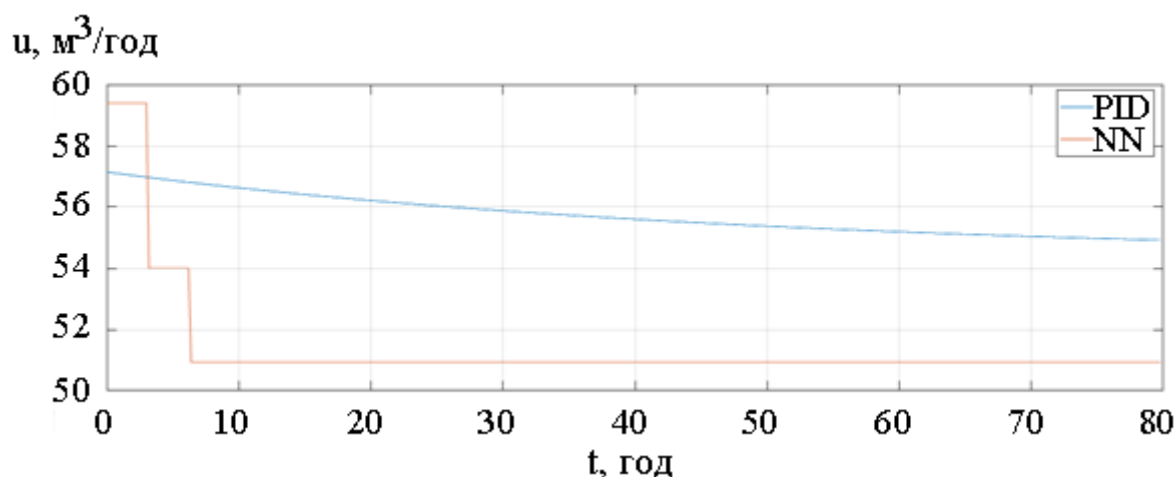


Рисунок 5.7. Графік зміни керувальної величини

На рис. 5.8. наведено графіки зміни температури по заготовкам № 1 та № 5 протягом всієї кампанії випалювання. З результатів слідує, що кінцеві температури нейромережевого регулятора нижчі, ніж при використанні ПІД-регулятора, що цілком відповідає середнім значенням витрат палива.

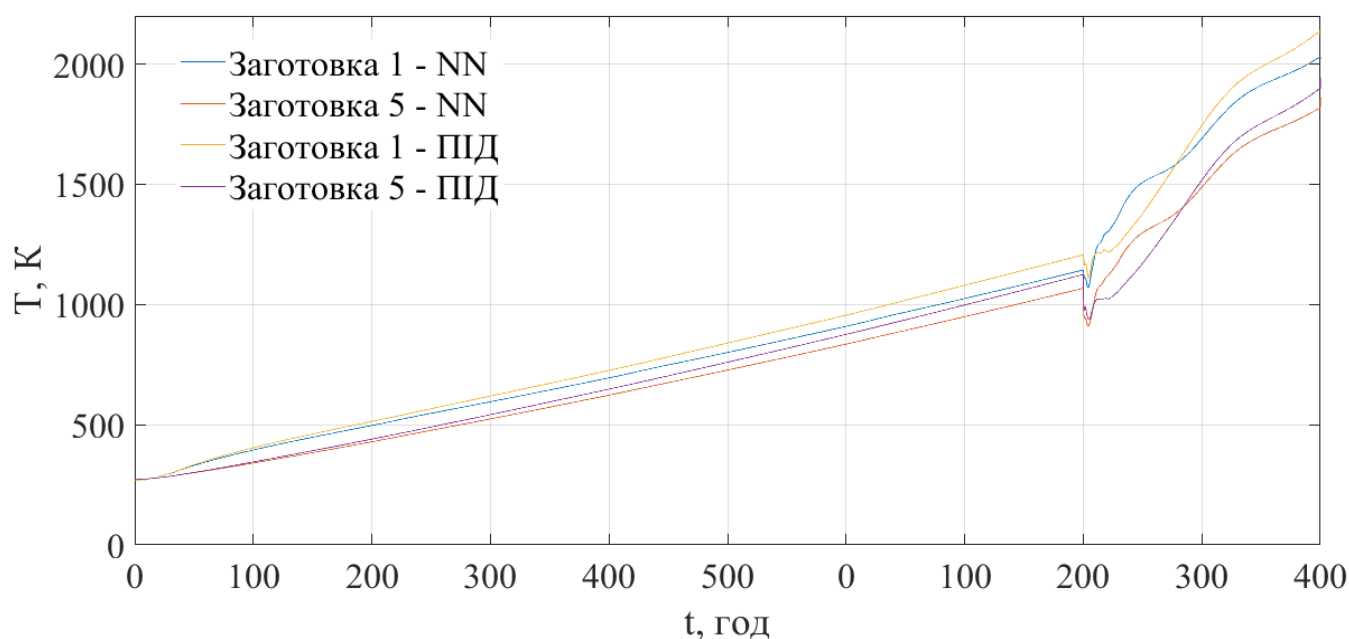


Рисунок 5.8. Графік зміни температури в заготовках протягом кампанії випалювання вуглецевих виробів

Графіки зміни температур в заготовках показані на рис. 5.9-5.10. З результатів видно, що значення приросту температури при підігріванні димовими газами становить $-2,5...2$ °С, що задовольняє рекомендаціям для досягнення цілісної структури заготовок. Максимальні значення перепаду прослідковуються в заготовці № 1, мінімальні відповідно у заготовці № 5, що пояснюється

особливістю роботи печі. З результатів видно, що при застосуванні нейромережевого регулятора прослідковується значні перепади при переході між етапами роботи печі.

Максимальний приріст температури на етапі камера «під вогнем» становить близько 120 °С а середній відповідно 4-3 °С, причому для нейромережевого регулятора графік приросту температур проходить нижче на діапазоні 20-40 годин ніж для ПІД-регулятора, що позитивно характеризує нейромереживий регулятор.

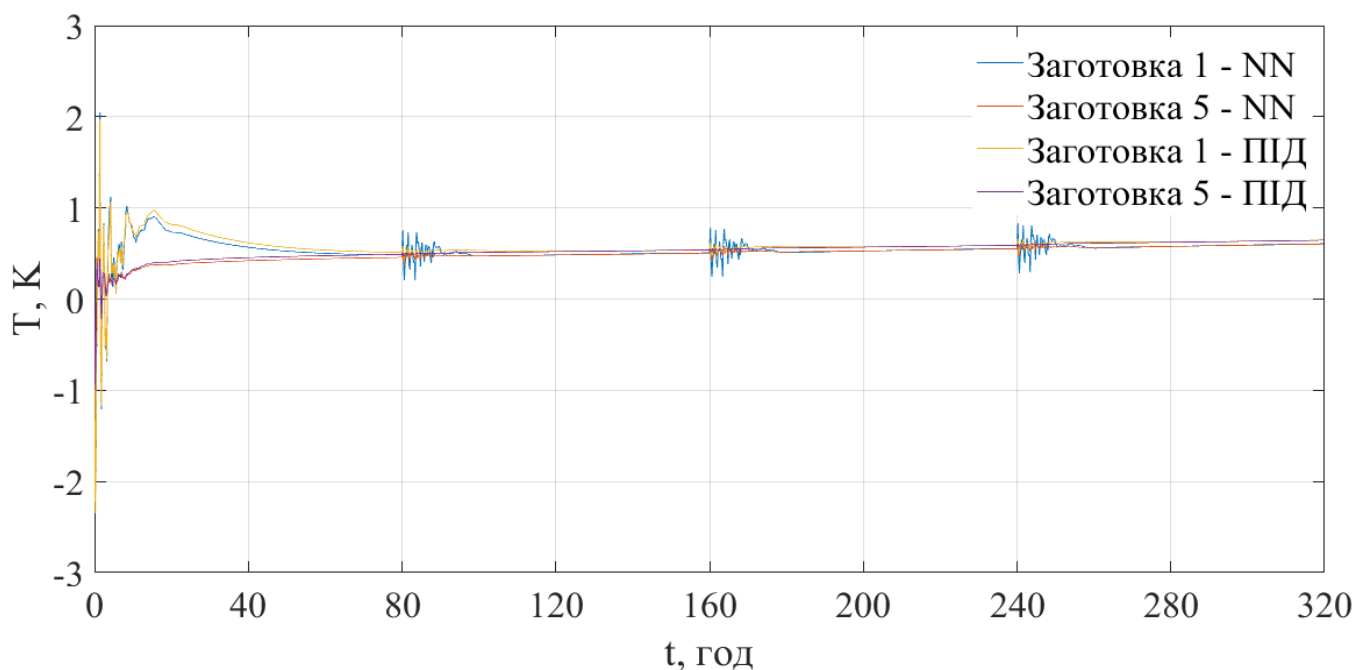


Рисунок 5.9. Графік зміни приросту температур по заготовкам на етапі камера на підігріванні димовими газами

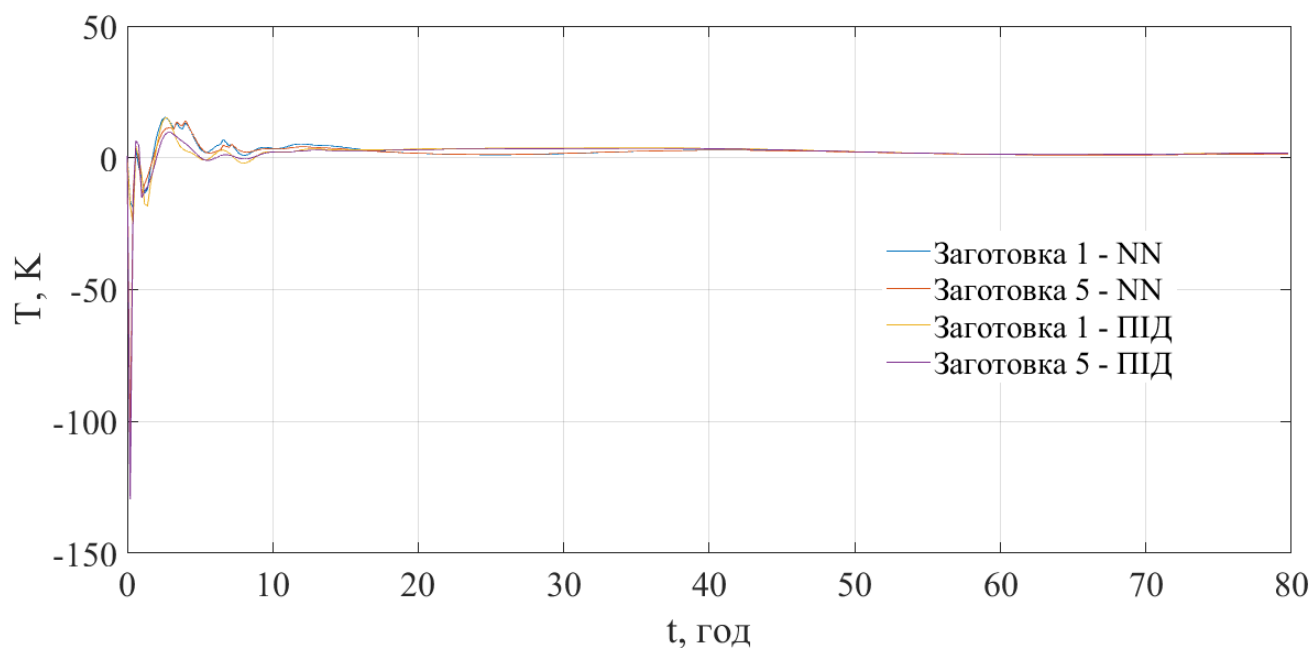


Рисунок 5.10. Графік зміни приросту температур по заготовкам на етапі камера «під вогнем»

Розроблений нейронмережевий регулятор має ряд переваг в порівнянні з існуючими на сьогоднішній день регуляторами, а саме:

можливість вибору кроку спуску визначає точність траєкторії оптимального спуску;

можливість вибору критерію оптимального спуску робить розроблений регулятор гнучким інструментом при використанні в різних умовах виробництва;

можливість застосування даного алгоритму в будь-який момент часу, наприклад після аварійної ситуації, дає змогу спрогнозувати можливість та ефективність продовження кампанії випалювання;

розроблений алгоритм дозволяє спрогнозувати час ведення кампанії випалювання та значення витрат палива, а тому спрогнозувати вартість готової продукції.

В порівнянні з існуючим на сьогоднішній день ПІД-регулятором, розроблений нейронмережевий забезпечує меншу витрату палива.

Розроблені вище нейронні мережі дозволяють реалізувати систему керування процесом випалювання вуглецевих виробів для отримання продукції відповідної якості з бездефектною структурою на основі прогнозування оптимального відповідно до завдання регламенту.

Алгоритм роботи даної системи:

1. Прогнозування температурних полів на заданий користувачем час прогнозу при заданому діапазоні можливих керувань. Наприклад, прогноз на 50 годин при всіх витратах палива з діапазону $10-50 \text{ м}^3/\text{год}$.
2. Формування поверхні ентропії в залежності від часу прогнозу та величини керування.
3. Прогнозування ймовірності дефекту для всіх варіантів готовності продукції. Вибір початкової точки спуску.
4. Прогнозування браку в усіх заготовках, та вибір максимального значення браку на кожному з кроків спуску.
5. Формування поверхні максимального браку в залежності від часу та керування.
6. Вибір з існуючої площини оптимального шляху. Наприклад, визначення по площині набору керувань, при яких забезпечується мінімальна ймовірність браку та досягнення максимальної готовності продукції.

Алгоритм роботи системи керування наведено на рисунку 5.11.

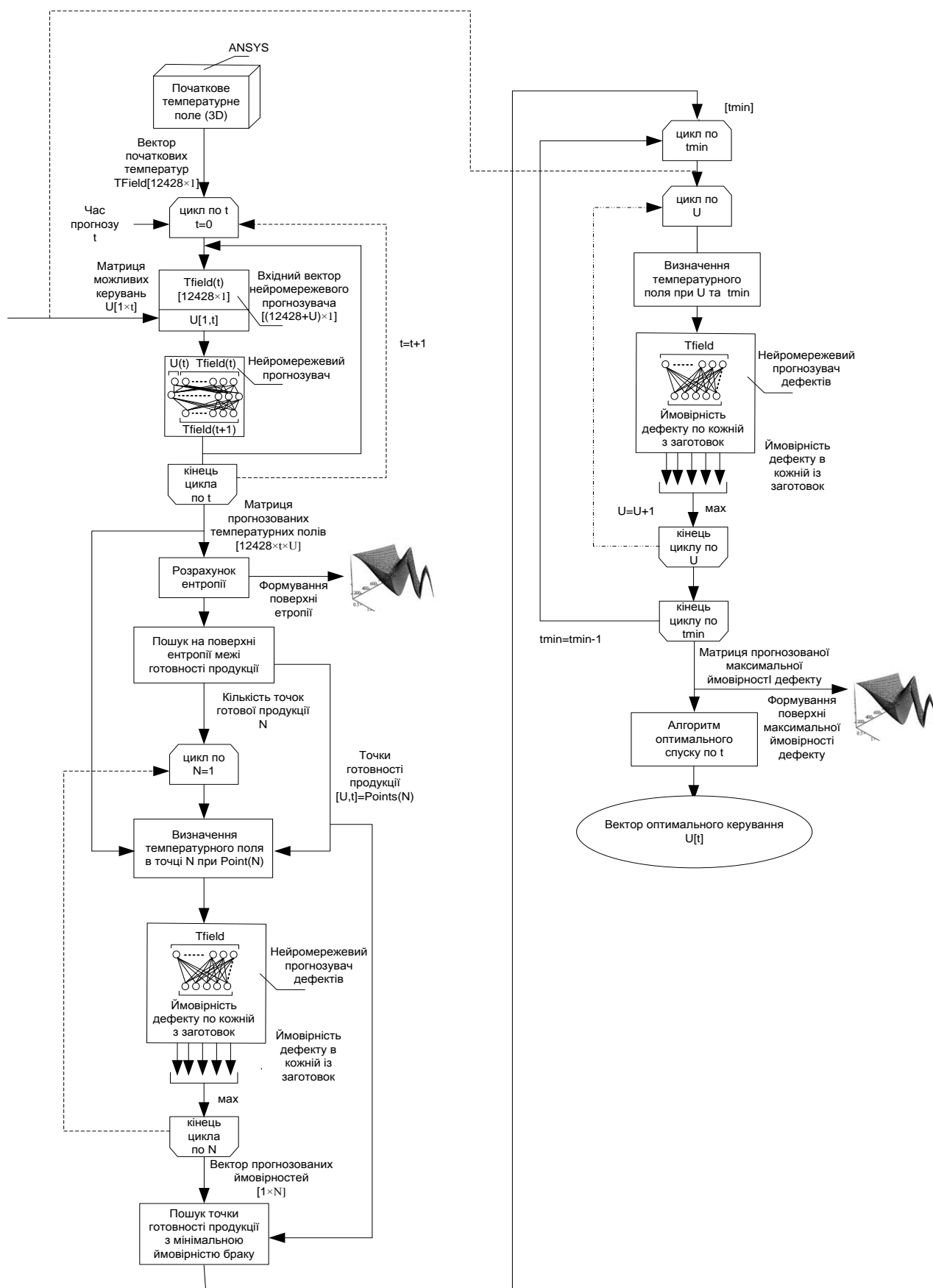


Рисунок 5.11. Алгоритм роботи системи керування процесом випалювання на базі штучних нейронних мереж

Висновки до розділу 5

1. Проведено обґрунтування доцільності використання штучних нейронних мереж при розробленні системи керування процесом випалювання вуглецевих виробів.

2. Розроблений підхід дозволяє враховувати ймовірність наявності дефекту у виробі як числову характеристику, а тому враховувати при подальшому керуванні або прийнятті рішення щодо останнього, що було неможливим досі.

3. Запропоновано системи керування етапу «камера під вогнем» на базі штучних нейронних мереж. Для підвищення ефективності ведення кампанії випалювання та визначення ймовірності дефекту, обумовлено застосування автоенкодера для вирішення задачі визначення ймовірності дефекту.

4. Визначені заходи, що передують розроблені штучної нейронної мережі: підготовка даних для навчання нейронної мережі та вибір архітектури мережі.

5. Синтезовано систему керування процесом випалювання вуглецевих виробів на базі штучних нейронних мереж та методів їх налаштування. Проведено дослідження роботи синтезованої системи керування в порівнянні з існуючими на сьогоднішній день систем керування, результати якого продемонстрували ефективність розробленої системи.

6. Дослідження якості роботи розробленої системи показали, що значення витрати палива при використанні нейромережевого регулятора нижче на 9%. З результатів видно, що для даного регулятора графік приросту температур на етапі камера «під вогнем» проходить нижче на діапазоні 20-40 годин, ніж для ПІД-регулятора, що позитивно характеризує нейромережевий регулятор.

Список використаних джерел до розділу 5

1. Bengio Y. (2009) Learning Deep Architectures for AI Foundations and Trends in Machine Learning, vol. 2, no. 1. — P. 1-127.
2. Bengio Y., Couville A. C., Vincent P. (2012.) Unsupervised Feature Learning and Deep Learning: A Review and New Perspectives. arXiv, <http://arxiv.org/abs/1206.5538>
3. Жученко О.А., Коротинський А.П., Хібеба М.Г. Математичне моделювання енергоємних технологічних процесів вуглеграфітового виробництва [текст] : монографія. —К.:КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. — 344 с.:іл. — 300 прим. ISBN 978-617-7503-56-8.
4. Чалых Е. Ф. Технология и оборудование электродных и электроугольных предприятий / Е. Ф. Чалых. — М. : Металлургия, 1972. — 432 с.
5. Шулепов С. В. Физика углеграфитовых материалов / С. В. Шулепов. — М. : Металлургия, 1972. — 256 с.
6. Deng L.(2014.) A Tutorial Survey of Architectures, Algorithms, and Applications for Deep Learning . APSIPA Transactions on Signal and Information Processing,
7. Rumelhart D. E., Hinton G. E., Williams R.J. (1986.) Learning Internal Representations by Propagation / / Parallel Distributed Processing. Vol 1: Foundations Cambridge, MA, Error USA: MIT Press
8. Rumelhart D. E., Hinton G. E., Williams R.J. (1988.) Learning Representations by Back-propagating Errors Neurocomputing: Foundations of Research Cambridge, MA, USA: MIT Press, P. 696-699.
9. Жученко О. А. Постановка задачі використання автоенкодера Для визначення ймовірності браку продукції процесу випалювання / Жученко О. А., Коротинський А. П. // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології [Текст]: Тези допові-дей Тринадцятої науково-практичної конференції

студентів. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 04–05 грудня 2019 р. [Електронний ресурс]. – 84 с.

10. A. Korotynskyi A system of automated control for the baking process that minimizes the probability of defects / A. Korotynskyi, O. Zhuchenko // Международный наукометрический научный журнал "СхідноЄвропейський журнал передових технологій". – 2020/ -№1/2(103). –С. 58-67.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язана актуальна науково-практична задача підвищення ефективності процесу випалювання вуглецевих виробів шляхом створення системи керування у відповідності до сучасних вимог ресурсо- та енергозбереження з забезпеченням продукції відповідної якості.

Основні наукові висновки і практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Проведений аналіз технологічного комплексу виробництва вуглецевих виробів як складної динамічної системи, у результаті якого визначено, що процес випалювання споживає основну масу енергоресурсів виробництва в цілому. Розглянуті технологічні особливості процесу випалювання, а також конструктивні особливості технологічного обладнання, де даний процес відбувається. Обґрунтовано застосування методу математичного моделювання як єдиного доступного методу дослідження технологічного процесу випалювання без значних енергозатрат або порушення правил безпеки. Сформульовані завдання дисертаційного дослідження.

2. В результаті аналізу існуючих математичних моделей процесу випалювання та схожих з ним процесів обрана модель, яка була використана для дослідження температурних полів даного процесу на трьох основних етапах ведення кампанії, а саме: охолодження, підігрівання димовими газами та камера «під вогнем». Результати дослідження надали можливість визначити залежність температурного поля касети печі від таких технологічних параметрів, як розрідження, надлишок повітря, початкові температури палива та повітря.

3. Проведене дослідження температурних полів робочого простору касети багатокамерної печі випалювання вуглецевих виробів закритого типу при різних режимах роботи. Результати дослідження свідчать про суттєву неоднорідність температурних полів, що негативно впливає на якість заготовок після обробки. Виявлено 3 характерні зони багатокамерної печі – холодна, підсклепінчата та гаряча, кожна з яких характеризується різною тепловою динамікою. Вивчено

особливості зміни теплової динаміки у ході кампанії випалювання, на кожному із ключових етапів. Особлива увага приділена виділенню характерних зон печі з мінімальною та максимальною температурами, а також з максимальним перепадом температур по заготовкам.

4. У зв'язку з неможливістю використання у системі керування реального часу повної математичної моделі, на базі якої проводились дослідження температурних полів печі обґрунтована необхідність побудови спрощеної математичної моделі.

5. В результаті проведеного аналізу існуючих методів спрощення математичних моделей у розподілених параметрах відповідно до поставлених вимог до спрощеної математичної моделі, обґрунтовано вибір методу розділення змінних Фур'є. На основі даного методу проведено спрощення математичних моделей основних етапів процесу випалювання вуглецевих виробів. Результати дослідження адекватності спрощених математичних моделей засвідчили високу точність розроблених моделей за статистичними критеріями Стюдента та Фішера.

6. Обґрунтовано доцільність застосування системи керування з прогнозуючою моделлю для керування процесом випалювання вуглецевих виробів. Ефективність розробленої системи керування підтверджена результатами проведеного імітаційного моделювання та порівнянням з системами керування на основі ПД-регулятора та селективного регулятора, запропонована система керування дозволяє зменшити витрати палива на 24 % та 11 % відповідно.

7. Розроблена система керування яка забезпечує зменшення ймовірності дефектів у заготовках на базі штучних нейронних мереж, з урахуванням обмеженості необхідних для навчання нейромережі даних шляхом переднавчання автоенкодера. Проведено дослідження роботи синтезованої системи керування в порівнянні з існуючими на сьогоднішній день системами керування, результати якого продемонстрували ефективність розробленої системи. Дослідження якості роботи розробленої системи показали, що витрата палива при використанні нейромережевого регулятора нижче на 9%.

8. Матеріали дисертаційної роботи використовуються у освітньому процесі кафедри автоматизації хімічних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».